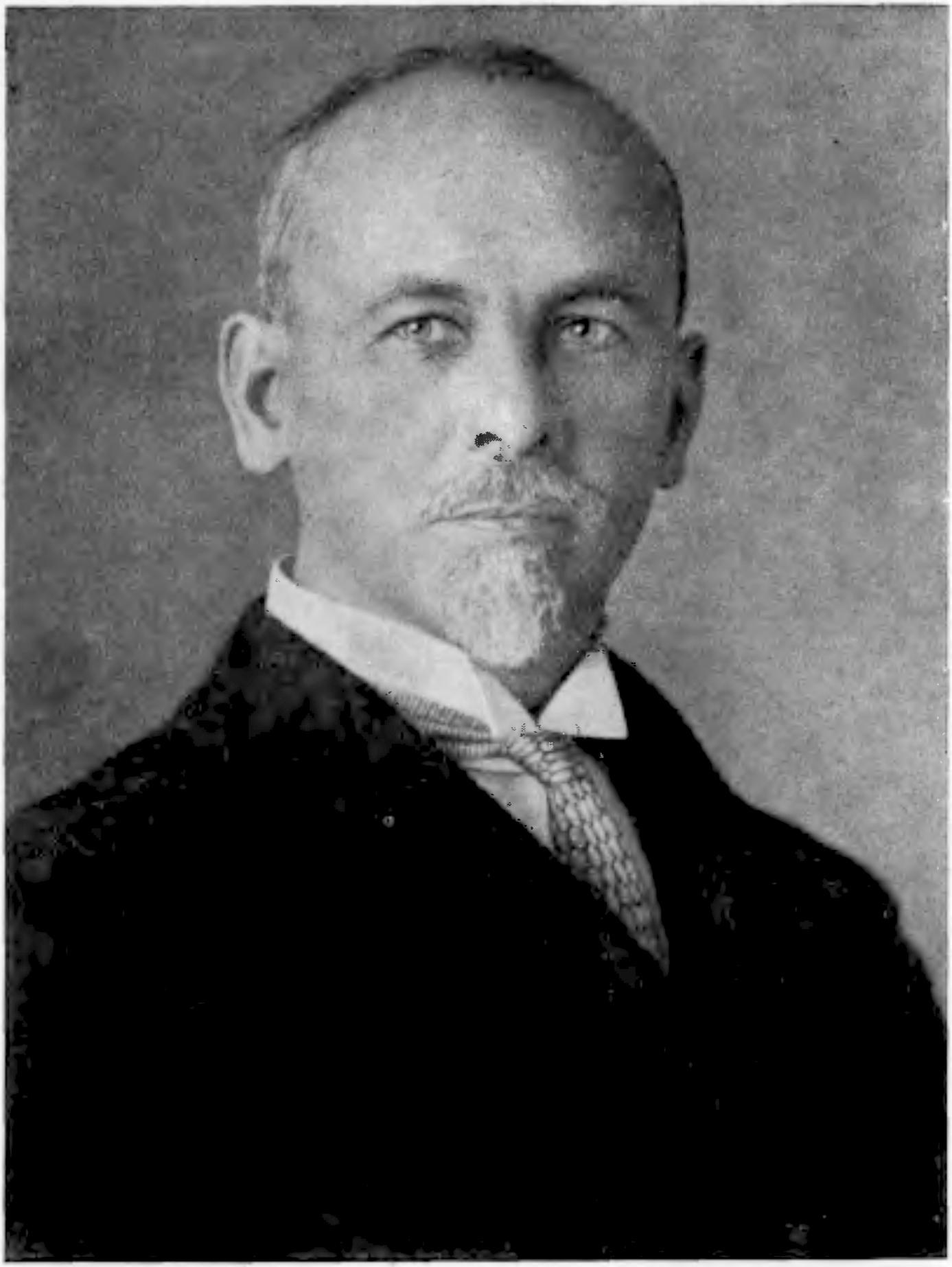


ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ МИТКЕВИЧ

22
М664

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

В. Ф. МИТКЕВИЧ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ НАУК СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

АКАДЕМИК
В. Ф. МИТКЕВИЧ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА-ЛЕНИНГРАД
1956

1959
25833

621.30 V

Ответственный редактор
чл.-корр. АН СССР *Л. Р. Нейман*

БИБЛИОТЕКА
ВОСТОЧНОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
2356/635 6/59

32
М664

ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящее однотомное издание избранных трудов академика В. Ф. Миткевича является первым собранием его сочинений.

В издание включены работы, которые содержат глубокие исследования и оригинальные решения разных научных задач в области электромагнитных явлений, новые предложения, имевшие большое значение для последующего развития электротехники, и некоторые доклады и выступления, характеризующие В. Ф. Миткевича как передового советского ученого. Ряд из этих работ устанавливает приоритет русской науки в важных вопросах современной электротехники.

Публикуемые труды в основном относятся к первой половине научной деятельности В. Ф. Миткевича. Работы, посвященные вопросу о природе электрического тока, в настоящее издание не включены, так как они вошли в большую монографию «Магнитный поток и его преобразования», изданную в 1946 г.

Трудам В. Ф. Миткевича предшествует краткий очерк о его научной и педагогической деятельности, написанный членами-корреспондентами АН СССР М. А. Шателеном и Л. Р. Нейманом и кандидатом технических наук И. А. Зайцевым. В конце сборника даны в хронологическом порядке список трудов В. Ф. Миткевича и указатель литературы и документов о нем.

Сборник составлен кандидатом технических наук В. М. Юриновым.

ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ МИТКЕВИЧ

Выдающийся русский ученый-электротехник академик Владимир Федорович Миткевич (1872—1951) своими трудами внес значительный вклад в развитие науки об электромагнитных явлениях и много способствовал распространению научных знаний в нашей стране и их практическим приложениям.

В. Ф. Миткевич родился 3 августа 1872 г. в г. Минске. В 1891 г. по окончании Минской гимназии он поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, студенты которого изучали в то время основы теории электромагнитных явлений на прекрасных лекциях проф. И. И. Боргмана, выпустившего в 1893 г. свой известный курс «Основания учения об электрических и магнитных явлениях». В лабораториях Физического института, созданного при Университете, стали проводиться многие экспериментальные работы в области электричества. Здесь, в стенах Университета, и определилось дальнейшее направление жизни и деятельности Владимира Федоровича Миткевича.

К этому периоду благодаря трудам М. Фарадея, Э. Х. Ленца, К. Максвелла и ряда других ученых были достигнуты значительные успехи в науке об электромагнитных явлениях. Однако практическая электротехника находилась еще в самой начальной стадии своего развития. Поэтому и дело специального электротехнического образования было еще в зачаточном состоянии. В. Ф. Миткевич оказался одним из тех активных деятелей, которые много сделали для организации на высоком научном уровне электротехнического образования в России.

Окончив в 1895 г. Университет, В. Ф. Миткевич начал преподавание электротехники в Петербургском электротехническом институте. Одновременно он стал преподавать физику и электротехнику в Петербургском горном институте (с 1896 по 1905 г.), несколько позже — физику на Петербургских высших

женских курсах (с 1898 по 1901 г.) и в Петербургском университете (с 1901 по 1902 г.).

Работа Владимира Федоровича в Электротехническом институте оказалась непродолжительной. Весной 1901 г. по приказу министра внутренних дел Сипягина, в связи со студенческими революционными волнениями, были уволены из института профессора М. А. Шателен, В. В. Скобельцын и др. В знак протеста В. Ф. Миткевич с группой профессоров и преподавателей покинул Институт. В 1902 г. он поступил преподавателем электротехники в только что основанный Петербургский политехнический институт, в котором и протекала его плодотворная научная и педагогическая деятельность в течение последующих 37 лет.

С 1904 г. В. Ф. Миткевич читал лекции на электромеханическом отделении Политехнического института по созданному им оригинальному курсу теории электрических и магнитных явлений. В этом курсе В. Ф. Миткевич, излагая учение об электромагнитных явлениях на основе идей Фарадея и Максвелла и широко пользуясь при этом математическими методами дал образцы глубокого физического анализа процессов в различных электротехнических устройствах и установил тем самым тесную связь между электрофизикой и электротехникой. Курс впервые был издан в 1910 г. под наименованием «Теория явлений электрических и магнитных», а затем в 1928, 1932 и 1933 гг. выходил под наименованием «Физические основы электротехники».

Вслед за этим курсом В. Ф. Миткевич начал чтение лекций по второму основному курсу электромеханического отделения «Теория переменных токов», который отличался такими же высокими достоинствами. В курсе «Теория переменных токов» В. Ф. Миткевич широко использовал графические и символический методы расчета цепей переменного тока, чем весьма содействовал их распространению.

Этими двумя курсами была заложена основа той научной дисциплины, которая в настоящее время именуется «Теоретическими основами электротехники» и является важнейшим звеном в системе высшего электротехнического образования.

Над своими курсами В. Ф. Миткевич непрерывно и интенсивно работал, и его лекции всегда отражали как личные исследования, так и все последние достижения науки и техники. Увлекательные и глубокие по содержанию лекции В. Ф. Миткевича неизменно собирали полную аудиторию студентов и

всегда были для них предметом оживленного обсуждения. На этих лекциях нередко можно было увидеть студентов старших курсов, повторно слушающих В. Ф. Миткевича.

Владимир Федорович умел с необычайной ясностью излагать самые сложные вопросы. Никогда не отступая от строгости и точности изложения, он всегда учил видеть за математическими символами физическое содержание описываемых с их помощью явлений. На курсах В. Ф. Миткевича воспитаны многие поколения наших инженеров-электриков.

Одновременно с созданием курсов «Теория электрических и магнитных явлений» и «Теория переменных токов» В. Ф. Миткевич организовал первую в России лабораторию по теоретическим основам электротехники, по образцу которой созданы аналогичные лаборатории во многих наших высших электротехнических школах. Эта лаборатория, предназначенная для ознакомления студентов на опыте с основными электромагнитными явлениями и со свойствами электрических цепей и методами их исследования, послужила также базой для ряда экспериментальных научных работ, выполненных В. Ф. Миткевичем и в последующем его учениками.

В 1906 г. В. Ф. Миткевич в Политехническом институте защитил на тему «О вольтовой дуге» диссертацию на звание адъюнкта и был избран профессором. С 1906 по 1912 г. В. Ф. Миткевич состоял также профессором физики на Петербургских высших женских политехнических курсах. Курс «Магнетизм и электричество», читанный им в этом высшем учебном заведении и изданный в 1912 г., пользовался исключительной популярностью.

В. Ф. Миткевич принимал активное участие в организации дипломного проектирования на электромеханическом отделении Политехнического института: под его руководством был выполнен ряд оригинальных дипломных проектов и экспериментальных дипломных работ. В. Ф. Миткевич был также первым лектором по курсу «Электрическая передача энергии» и принимал активное участие в создании первой в России лаборатории по технике высоких напряжений.

В 1912 г. В. Ф. Миткевич избирается на должность декана электромеханического отделения, в которой состоял до 1916 г. Работа В. Ф. Миткевича на посту декана содействовала укреплению лучших традиций отделения, а исключительно чуткое и заботливое отношение к студентам и их нуждам сделало его одним из наиболее любимых и уважаемых профессоров Института.

Более 35 лет возглавлял В. Ф. Миткевич в Ленинградском политехническом институте имени М. И. Калинина кафедру «Теоретические основы электротехники». За это время он воспитал многие тысячи студентов и создал в Институте школу по теоретической электротехнике, влияние которой распространилось далеко за пределы института.

* *
*

Научная деятельность В. Ф. Миткевича была исключительно широкой и разносторонней. Им опубликовано 17 научных монографий и учебников и свыше 120 статей и докладов в различных научно-технических журналах.

В начальный период своей научной деятельности В. Ф. Миткевич выполнил работу по исследованию алюминиевого выпрямителя, уделив в ней внимание как физическим явлениям в самом выпрямителе, так и рассмотрению режима в электрической цепи с выпрямителем. Здесь впервые были предложены новые схемы выпрямления переменного тока, получившие в дальнейшем весьма широкое применение.

Исключительное значение имеют работы В. Ф. Миткевича по исследованию природы электрической дуги, начатые еще в период его работы в Горном институте и завершенные в лаборатории Политехнического института. Серия работ В. Ф. Миткевича по изучению электрической дуги была объединена в монографию «О вольтовой дуге». В этих классических работах, удостоенных в 1907 г. премии имени А. С. Попова, В. Ф. Миткевич исследовал физическую природу давления дуги на анод и определил на основании этого исследования отношение заряда электрона к его массе, установил основную роль испускания электронов катодом в процессе образования и поддержания дуги, исследовал обратную э. д. с. дуги, выяснил роль температуры катода и возможность получения дуги при очень малой э. д. с. с дополнительным подогреванием катода, исследовал несимметрию переменного тока при несимметрии электродов и указал возможность использования этой несимметрии для выпрямления тока. Указанные опыты по изучению электрической дуги отличаются простотой, изяществом и остроумием. Спустя несколько лет, В. Ф. Миткевич выполнил совместно с проф. А. И. Горбовым обширную работу по фиксации азота воздуха при помощи электрической дуги.

Труды В. Ф. Миткевича по исследованию электрической дуги легли в основу последующих многочисленных работ различ-

ных авторов во многих областях современной электротехники — в технике высокого напряжения, электротермии, электросварке, освещении и т. д.

Большое практическое значение имеет исследование В. Ф. Миткевича по изучению явления короны на проводах высокого напряжения, выполненное им в период создания при Политехническом институте первой в России лаборатории высокого напряжения. Результатом этой работы явилась статья «Явления тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи» (журнал «Электричество», № 27 за 1910 г.). В. Ф. Миткевич первый предложил применять в линиях высокого напряжения расщепленные провода с целью повышения критического напряжения, при котором появляется корона.

Эта замечательная идея, высказанная впервые Владимиром Федоровичем Миткевичем в период, когда только начинали создаваться первые электропередачи высокого напряжения 110—120 кв, в настоящее время является одной из тех идей, использование которых дает практическое решение проблемы передачи электрической энергии больших мощностей на сверхдальние расстояния. Предложение В. Ф. Миткевича не только приводит к снижению потерь на корону, но и обеспечивает устойчивость работы энергетических систем, связанных сверхдальними линиями передачи большой мощности.

При изучении явления короны В. Ф. Миткевич проанализировал со свойственной ему глубиной результаты исследований Мершона (США), показав необоснованность его выводов, и дал впервые научно обоснованный метод определения критического коронного напряжения.

В последние годы идею и изобретение расщепленных проводов с целью устранения или уменьшения потерь на корону зарубежная печать приписывает американским инженерам. Насколько это несостоятельно показывает статья В. И. Попова и Л. З. Сидлика «Об изобретении расщепленных проводов», опубликованная в журнале «Электричество» № 8 за 1953 г., в которой на основе документальных данных подтверждается приоритет В. Ф. Миткевича в этом вопросе.

Из других многочисленных работ В. Ф. Миткевича следует отметить его статью по теории флюксметра. В ней В. Ф. Миткевич не ограничивается формальным рассмотрением теории, а особо обращает внимание на то, что флюксметр «представляет интерес не только как весьма полезный измерительный прибор, но еще и как в высшей степени изящная иллюстрация закона сохранения магнитного потока». Такое стремление вы-

делить основное физическое содержание исследуемого явления отличало все работы В. Ф. Миткевича.

Представляют интерес работы, выполненные В. Ф. Миткевичем совместно с Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом, по изучению причин намагничения горных пород. Здесь высказывается мысль, что причиной намагничения горных пород является как земное магнитное поле, так и магнитное поле тока молнии. Последнее весьма важно для объяснения наблюдаемых магнитных аномалий.

На протяжении многих лет и в настоящее время в научном мире ведется большая работа по упорядочению систем единиц измерения. В. Ф. Миткевич и в этих вопросах принимал активное участие, что нашло отражение в его статье «К вопросу о практических магнитных единицах».

В. Ф. Миткевич неизменно откликался на все научные проблемы, выдвигаемые жизнью, и всегда страстно поддерживал все прогрессивное, добиваясь, как истинный патриот своей родины, чтобы в нашей стране широко развертывались исследования в области важнейших народнохозяйственных проблем. Эту сторону его деятельности иллюстрирует статья «Состояние исследовательской работы по магнитному анализу и магнитной дефектоскопии в СССР и ближайшие задачи ее развития» и его выступление на I Всесоюзной конференции по электропередаче больших мощностей на большие расстояния токами сверхвысоких напряжений.

* *
*

Научные заслуги В. Ф. Миткевича получили после Великой Октябрьской социалистической революции широкое признание. В 1927 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 1929 г. — действительным членом Академии Наук СССР и в том же году удостоен премии имени В. И. Ленина. С 1935 г. В. Ф. Миткевич руководил организованной в том же году группой технической физики Отделения технических наук АН СССР. В научных исследованиях, проводимых этой группой, уделялось большое внимание актуальным вопросам промышленности. В. Ф. Миткевич вел большую работу в комиссиях Академии Наук СССР по проводниковым и магнитным материалам, единицам измерений, акустике и службе времени.

В 1935 г. В. Ф. Миткевич возглавил в Отделении технических наук АН СССР секцию по разработке научных проблем электросвязи и взял на себя руководство секцией теоретиче-

ской электротехники и магнитной лаборатории Энергетического института АН СССР.

В. Ф. Миткевич принимал деятельное участие в работах Института истории науки и техники АН СССР. Под его редакцией были изданы монографии «Динамомашина в ее историческом развитии» и «Электродвигатель в его историческом развитии».

Весьма обширной и плодотворной была и общественная деятельность Владимира Федоровича. Он принимал активное участие в работах Русского электротехнического комитета Международной Электротехнической Комиссии и Центрального электротехнического совета. В течение многих лет он работал ответственным секретарем редакции и членом редакционной коллегии журнала «Электричество».

В 1933 г. В. Ф. Миткевичу присваивается звание заслуженного деятеля науки и техники, а за работы, связанные с обороной страны, он в том же году награждается орденом Красной Звезды. В 1943 г. В. Ф. Миткевич за свои научные труды был удостоен Сталинской премии, а в 1945 г. — награжден орденом Трудового Красного Знамени. 29 августа 1947 г. за многолетнюю плодотворную научную и педагогическую деятельность в области электротехники, в связи с семидесятипятилетием со дня рождения, В. Ф. Миткевич был награжден орденом Ленина.

Член-корреспондент АН СССР *М. А. Шателен*

Член-корреспондент АН СССР *Л. Р. Нейман*

Кандидат техн. наук *И. А. Зайцев*

АЛЮМИНИЕВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Электричество, № 2, 1901, стр. 17—28; № 3, стр. 33—36.

1. Алюминиевый выпрямитель переменного тока, с которым я работал и о котором говорится в настоящей статье, состоит из алюминиевого и свинцового электродов, погруженных в раствор двууглекислой соды. Грец [1], впервые устроивший подобный выпрямитель, в качестве проводящей жидкости применил раствор серной кислоты. Другими исследователями испробованы были иные жидкости, именно растворы квасцов, двухромокислого натрия, едкого натра и т. д. Мной был взят раствор двууглекислой соды по совету А. А. Кракау, применявшего этот раствор в своих опытах с алюминиевым выпрямителем.

Раствор двууглекислой соды представляет то преимущество, что, во-первых, он весьма слабо действует на алюминий и, во-вторых, при применении его можно ограничиться одним только выпрямителем в цепи с напряжением до 150 в. При применении же, например, раствора серной кислоты необходимо соединять последовательно, вообще говоря, несколько выпрямителей, причем, число их должно быть равно $\frac{U_1 - U_2}{22}$ (здесь U_1—U_2 есть напряжение в цепи).

2. При опытах в цепь с напряжением в 100 в включались последовательно с выпрямителем амперметр A_1 с постоянным магнитным полем, тепловой амперметр A_2 и ламповый или проволочный реостат R (рис. 1). Вначале применялся алюминиевый электрод в виде прямоугольной пластинки, по площади приблизительно равный свинцовому электроду. Если алюминиевая пластинка совершенно свежая или давно не была в употреблении, то при замыкании переменного тока наблюдается следующее.

В первый момент стрелка магнитоэлектрического амперметра стоит на нуле, т. е. по цепи идет симметричный переменный ток, силу которого дает тепловой амперметр. В последующие моменты мало-помалу начинают расти показания магнитоэлектрического амперметра, показания же теплового амперметра уменьшаются; при этом магнитоэлектрический прибор свидетельствует о том, что в цепи преобладает направление тока, при котором алюминиевый электрод бывает катодом.

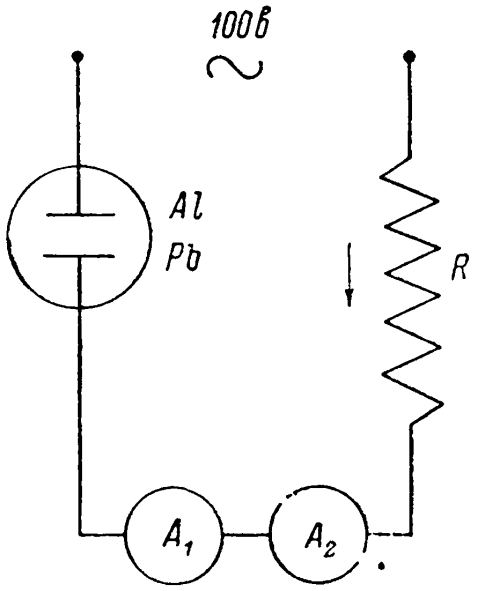


Рис. 1.

Наконец, явление устанавливается, причем показания магнитоэлектрического амперметра всегда остаются меньше показаний теплового. Период установления явления, как показал опыт, зависит от чистоты поверхности алюминиевого электрода, от плотности переменного тока и многих других обстоятельств; при этом продолжительность этого периода довольно значительна и в некоторых случаях достигала 30 сек.

3. При прохождении тока через выпрямитель алюминиевый электрод оказывается местом интересных световых явлений. Если наблюдение ведется в темной комнате, то алюминиевый электрод кажется окруженным голубоватым сиянием. При внимательном рассмотрении можно заметить, что это сияние неоднородно, что свечение концентрируется в отдельных точках и что точки эти разбросаны, вообще говоря, без всякой системы, за исключением целого ряда светящихся точек, располагающихся вдоль линии соприкосновения поверхности жидкости и электрода.

Описываемое явление позволяет предположить, что в процессах, совершающихся на алюминиевом электроде, не вся его поверхность принимает участие в одинаковой степени. Дальнейшие наблюдения вполне подтверждают это предположение. Если алюминиевый выпрямитель проработает довольно продолжительное время, то при рассмотрении алюминиевого электрода мы найдем его поверхность усеянною точками, в которых алюминий разъеден. Точки эти представляют собою места, в которых алюминий расходуется при работе выпрямителя.

В других частях поверхность электрода представляется нетронутой, неизменной. Этого, однако, не может быть. Если бы

во время работы выпрямителя алюминиевый электрод всей своей поверхностью соприкасался с раствором, то несомненно вся поверхность и принимала бы участие в процессах, совершающихся около электрода. Как выше сказано, опыт этого не подтверждает.

То обстоятельство, что при работе выпрямителя на поверхности алюминиевого электрода появляются точки, в которых происходит разрушение его и в которых сосредоточено свечение, заставляет предположить, что только в этих точках и происходит соприкосновение алюминия с жидкостью и что в прочих частях поверхности электрода металл чем-то отделен от жидкости. Вероятность такого предположения вытекает из того, что, как показал еще Н. П. Слугинов, алюминий может быть покрыт электролитически тонким прозрачным слоем окиси алюминия. Вещество это является очень хорошим изолятором.

Присутствие в некоторых случаях слоя окиси алюминия на поверхности алюминиевой пластинки, служившей электродом в выпрямителе, легко доказывается тем, что такой пластинкой иногда можно произвести след на поверхности стекла. След этот представляет собой тонкие царапины, которые могут быть произведены только веществом более твердым, чем стекло. Кроме того, в настоящее время установлено, что поверхность алюминиевого электрода может покрываться и другими дурно проводящими соединениями алюминия. Характер этих соединений зависит от состава взятой жидкости.

Итак, весьма вероятно, что соприкосновение алюминия с жидкостью происходит не по всей поверхности электрода, а только в отдельных точках. В таком случае необходимо допустить, что в этих отдельных точках плотность тока велика, и потому можно ожидать, что явления, происходящие у поверхности алюминиевого электрода, будут аналогичны уже знакомым явлениям, в которых первенствующую роль играет большая плотность тока.

4. Как известно, при очень большой плотности тока, на поверхности электрода имеют место световые явления. Изучением их занимались Н. П. Слугинов, Колли и другие. Кроме того, под влиянием значительного теплового эффекта, обусловленного большой плотностью тока, в цепи происходят периодические изменения силы тока. На этом основан так называемый Венельтовский прерыватель, состоящий из двух электродов, опущенных в проводящую жидкость. Один электрод — угольная или свинцовая пластина значительной поверхности, вторым

электродом служит обыкновенно платиновая проволока в несколько миллиметров длиной, следовательно, с очень малой поверхностью.

При замыкании цепи постоянного тока, в которой находится Венельтовский прерыватель, происходят явления, картину которых можно представить следующим образом.

Благодаря большой плотности тока на поверхности платиновой проволочки выделяется значительное количество тепла, за счет которого образуется парообразная оболочка, обволакивающая платиновую проволочку и отделяющая ее от проводящей жидкости. Вследствие этого происходит прерывание тока в цепи, и вместе с током иссякает и источник тепла. Парообразная оболочка конденсируется от соприкосновения с массой более холодной жидкости, и снова происходит соприкосновение платинового электрода с этой жидкостью. Вновь устанавливается ток, и явления повторяются в той же последовательности.

При работе Венельтовского прерывателя замечается свечение вокруг платинового электрода и слышен резкий звук, по высоте соответствующий числу прерываний тока в секунду. Кроме того, у платинового электрода наблюдается аномальный электролиз, т. е. наблюдается выделение как кислорода, так и водорода.

5. Число прерываний тока, производимых Венельтовским прерывателем при прочих равных условиях, зависит, как показывает опыт, от того, каким электродом является платиновая проволочка: катодом или анодом. Именно, число прерываний больше, когда платиновая проволочка будет анодом. В частном предельном случае, когда число прерываний очень велико, все происходит так, как будто бы прерываний вовсе нет, а жидкость у электрода приходит в особое состояние, названное Н. П. Слугиновым «электросфероидальным».

Зависимость числа прерываний от того, будет ли малый электрод катодом или анодом, становится понятной на основании замеченного Н. П. Слугиновым и другими наблюдателями факта, что при явлениях, в которых играет роль большая плотность тока, на электроде с малой поверхностью, служащем анодом, выделяется больше тепла, чем в том случае, когда он служит катодом. Если это так, то число прерываний должно быть больше в том случае, когда, при прочих равных условиях, на платиновом электроде выделяется больше тепла и благодаря этому быстрее образуется вокруг него парообразная оболочка, прерывающая ток.

От числа прерываний должно зависеть количество электричества, которое может протечь в цепи по тому или другому направлению: чем будет больше число прерываний, тем меньше в единицу времени протечет электричества. Количество протекшего электричества будет поэтому больше, когда платиновая проволочка служит катодом, чем когда она служит анодом.

Отсюда следует, что в цепи переменного тока Венельтовский прерыватель пропустит по одному направлению больше кулонов, чем по другому. Явление это давно известно. Оно наблюдалось Д'Арсонвалем и другими еще в восьмидесятых годах.

Таким образом, Венельтовский прерыватель может быть употребляем в роли выпрямителя переменного тока. С его помощью некоторое время заряжались аккумуляторы в физической лаборатории Высших женских курсов непосредственно от цепи переменного тока. Неудобство подобного выпрямителя состоит в необходимости постоянно следить за его работой, так как для правильной работы поверхность проволочки должна быть в соответствии с силой тока; поверхность же эта непрерывно уменьшается вследствие распыления электрода.

Весьма, конечно, вероятно, что при работе Венельтовского прерывателя в качестве выпрямителя, кроме частоты, играют некоторую роль еще и другие обстоятельства.

6. Вышеизложенные соображения заставляют предполагать, что в алюминиевом выпрямителе у поверхности алюминиевого электрода мы имеем дело с тем же явлением, что и в Венельтовском прерывателе около платиновой проволочки. С такой точки зрения действующий алюминиевый электрод представляется нам как целый ряд Венельтовских прерывателей, соединенных и работающих параллельно. Каждая точка на поверхности алюминиевого электрода, в которой наблюдается свечение и разъедание металла, является в роли платиновой проволочки Венельтовского прерывателя.

Теперь становится понятным, почему при работе алюминиевого выпрямителя явление не устанавливается сразу. Именно, в первый момент по замыкании переменного тока вся поверхность алюминиевого электрода является проводящей и по цепи идет только симметричный переменный ток. В цепи начнет преобладать ток одного направления лишь тогда, когда благодаря электролизу почти вся поверхность алюминия покроется дурно проводящим слоем; слой иногда, однако, не бывает сплошным: в нем огромное число отверстий, пор; поры эти являются единственным местом, через которое проходит ток, и при этом про-

исходят процессы, обусловливаемые большой плотностью тока.

Приведенное объяснение действия алюминиевого выпрямителя подтверждается опытом с телефоном. Как известно, телефон, введенный в цепь переменного тока, дает звук, по высоте соответствующий числу полных периодов переменного тока в секунду. Если бы алюминиевый выпрямитель просто задерживал одну половину кривой переменного тока и на алюминиевом электроде не происходило бы никаких явлений, аналогичных происходящим в Венельтовском прерывателе, то введение алюминиевого выпрямителя в цепь переменного тока не должно было бы изменять характера и высоты звука, издаваемого телефоном.

Опыт показывает противное. Основной звук в телефоне остается прежний, но его начинают сопровождать высшие добавочные тона. Эти добавочные тона производят впечатление неопределенного шума, что и понятно, если действительно правилен наш взгляд на действие алюминиевого электрода.

Мы имеем дело с большим числом параллельно работающих Венельтовских прерывателей. Периоды их различны в зависимости от плотности тока в каждой отдельной точке. Изменения в силе тока, производимые каждым прерывателем, налагаются одно на другое и в результате мы имеем в цепи, кроме основного периодического изменения силы тока, еще второстепенные беспорядочные колебания. Колебания эти очень незначительны, сравнительно с силой тока в каждый данный момент, но в телефоне они явственно обнаруживаются в виде шума, сопровождающего основной тон.

7. Так как в алюминиевом выпрямителе работает не вся поверхность алюминиевой пластинки, а только отдельные ее точки, то, следовательно, нет никакой надобности брать алюминиевый электрод с большой поверхностью. Очень хорошие результаты получаются при употреблении алюминиевой проволоки от 2 до 5 мм диаметром; при этом длина проволоки берется таковой, чтобы на каждый сантиметр длины ее приходилось около одного ампера, считая по магнитоэлектрическому амперметру.

Применение алюминиевого электрода малой поверхности выгодно еще в том отношении, что в этом случае алюминиевый выпрямитель работает весьма правильно и не требует никакого досмотра; алюминиевый же электрод служит до тех пор, пока совсем не израсходуется. Необходимо только позаботиться, чтобы алюминиевый электрод, погружаемый первый раз в жидкость, имел совершенно чистую металлическую поверхность.

Это достигается проще всего обстругиванием поверхности алюминиевой проволоки при помощи ножа.

При применении же алюминиевого электрода с большой поверхностью через некоторое время после замыкания цепи выпрямитель начинает работать неудовлетворительно, т. е. по цепи начинает проходить ток по обоим направлениям. Чтобы бороться с этим, приходится довольно часто прерывать на время ток и чистить поверхность алюминия наждаком и т. п., что весьма неудобно.

Алюминиевые электроды с большой поверхностью начинают работать неудовлетворительно вероятно потому, что в этом случае легко возможно чрезмерное увеличение числа действующих точек и, таким образом, плотность тока в этих точках уменьшается, ослабляются, следовательно, и явления, связанные с большой плотностью тока. Если же поверхность алюминиевого электрода очень невелика, то, повидимому, не столь легко возможно увеличение числа действующих точек и плотность тока сама собой поддерживается наивыгоднейшая для целей выпрямления тока.

8. Для исправного действия алюминиевого выпрямителя необходимо еще одно условие. Именно, температура проводящей жидкости не должна подниматься выше определенного предела. Это одинаково важно и в том случае, когда мы в качестве выпрямителя будем пользоваться Венельтовским прерывателем. Из опытов, произведенных в физической лаборатории Высших женских курсов В. А. Кашерининовой, следует, что в обоих случаях невыгодно, чтобы температура была выше 60°C.

Раствор двууглекислой соды применяется крепостью в 7—8%. При работе алюминиевого выпрямителя с раствором двууглекислой соды образуется гидрат окиси алюминия, осаждающийся на дно сосуда в виде студенистой массы. Время от времени необходимо этот осадок отфильтровывать. Самый раствор служит неопределенно долгое время.

Таким образом, расходуется только алюминий и то в очень незначительном количестве, так что расходы по содержанию алюминиевого выпрямителя ничтожны.

9. Алюминиевый выпрямитель, выработанный мной при содействии В. А. Кашерининовой, устроен, как показано на рис. 2 в разрезе. Здесь A — стеклянный сосуд емкостью около 5 л, B — дубовая крышка, к которой прикреплен полосками L охлаждающий змеевик D, изготовленный из свинцовой трубки, K и K' — концы трубки змеевика, E — свинцовый цилиндр, соединенный с зажимом M и служащий одним из электродов,

H — пробка, через которую проходит стеклянная трубка *C*. Сквозь эту трубку проходит алюминиевая проволока *Al*. Конец *G* этой проволоки помещен как раз внутри цилиндра *E*. *F* — кусочек резиновой трубки, надетый на стеклянную трубку *C* и плотно обхватывающий алюминиевую проволоку. *N* — зажим, которым алюминиевая проволока вводится в цепь. *PQ* — уровень жидкости в сосуде. Размеры отдельных частей прибора следующие. Холодильник имеет в длину около 20 см, в диаметре — около 5 см. Поверхность свинцового электрода *E* равна приблизительно 120 см^2.

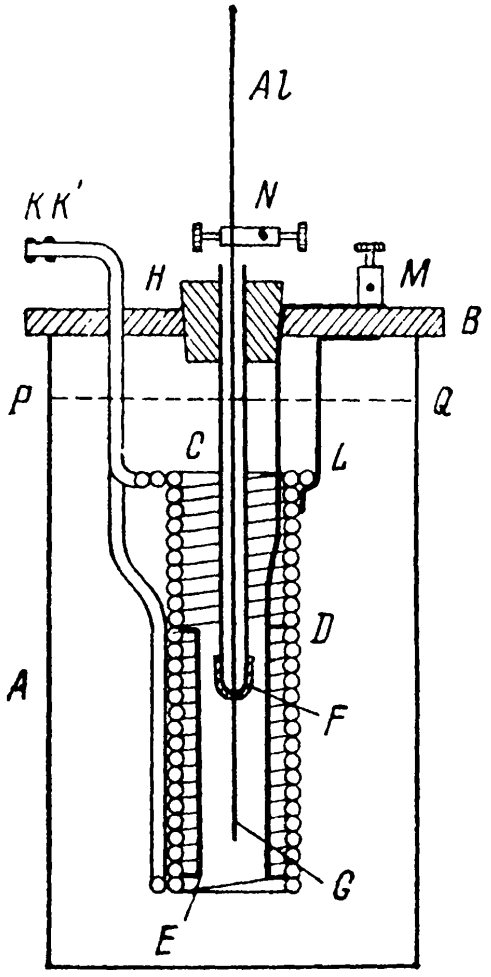


Рис. 2.

В некоторых случаях внутри свинцового цилиндра *E* помещается не один алюминиевый электрод, а два или три. При этом электроды эти должны быть хорошо изолированы друг от друга. Случаи, когда применимы подобные сложные выпрямители, будут ниже указаны.

10. Для измерения тока при работе с алюминиевым выпрямителем в цепь последовательно включились два амперметра: магнитоэлектрический и тепловой. Первый дает среднюю силу тока за время полного периода, второй — действующую.

Что показания магнитоэлектрического прибора (с постоянным магнитом) могут соответствовать средней силе тока — это вытекает из следующего.

Сила тока есть некоторая функция времени

$$i = f(t).$$

Рассмотрим условия равновесия подвижной рамки. Если подвижная система благодаря достаточной апериодичности получает под влиянием изменяющегося тока некоторое постоянное отклонение и находится в покое, в таком случае сумма импульсов внешних сил, приложенных к ней за время полного периода T, равна нулю:

$$\int_0^T Hinladt - caT = 0,$$

где H — напряжение поля между полюсами, i — сила тока, n — число витков рамочки, l и a — длина и ширина каждого витка, c — постоянная кручения спиральных пружин, α — угол отклонения.

Отсюда можно написать:

$$\frac{1}{T}\int_0^T idt = \frac{c}{Hnla}\alpha,$$

т. е. сила тока средняя за время полного периода пропорциональна углу отклонения α, постоянный же коэффициент $\frac{c}{Hnla}$ имеет тот же вид, что и в случае постоянного по силе тока. Одним словом, показания прибора прямо должны соответствовать средним силам тока.

Все это совершенно справедливо для случая, когда весь измеряемый ток проходит через подвижную рамку амперметра. Обыкновенно, однако, обмотка рамки шунтирована малым сопротивлением. При этом отношение коэффициента самоиндукции обмотки рамки и шунта может не быть равно отношению их сопротивлений, а потому шунтирующая способность малого сопротивления изменится для случая непостоянного тока. Ввиду этого обстоятельства желательно было опытным путем поверить шкалу амперметра. Для такой цели последовательно с поверяемым амперметром в цепь вводился медный вольтаметр. Три наблюдения имели результатом следующие данные (в амперах):

Сила тока из показаний	вольтаметра . . .	0.80	1.64	1.55
	амперметра . . .	0.80	1.58	1.58

Некоторое разногласие результатов второго и третьего опытов объясняется колебаниями напряжения в цепи переменного тока.

Таким образом, практически можно прямо принимать готовую шкалу прибора.

11. В дальнейшем мы ради простоты допускаем, что кривая тока составлена из частей двух синусоид так, как показано на рис. 3, т. е. верхние части кривой имеют амплитуду a, нижние — b.

Средняя сила тока за время полного периода T будет:

$$I_{ср.} = \frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} a\sin\frac{2\pi t}{T}\,dt - \int_0^{T2} b\sin\frac{2\pi t}{T}\,dt\right] = \frac{a-b}{\pi}.$$

Действующая сила тока будет:

$$I_{\text{действ.}} = \sqrt{\frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} a^2 \sin^2 \frac{2\pi t}{T}\, dt + \int_0^{T/2} b^2 \sin^2 \frac{2\pi t}{T}\, dt\right]} = \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2}.$$

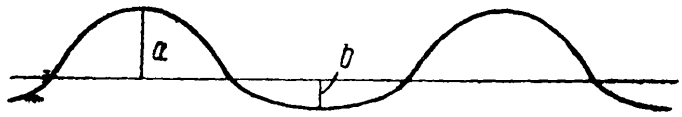


Рис. 3.

Если бы удалось совершенно задержать алюминиевым выпрямителем одну половину кривой тока, т. е. если бы b равнялось нулю, то имели бы место следующие соотношения:

$$I_{\text{ср.}} = \frac{a}{\pi},$$

$$I_{\text{действ.}} = \frac{a}{2}.$$

В таком случае

$$\frac{I_{\text{действ.}}}{I_{\text{ср.}}} = \frac{\frac{a}{2}}{\frac{a}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = \frac{3.14}{2} = 1.57.$$

Вообще это отношение может служить мерилом степени выпрямления тока. Для случая симметричного переменного тока оно обращается в бесконечность, при постоянном же токе оно равно единице. Чем совершеннее выпрямлен переменный ток, т. е. чем меньше относительные колебания силы тока, тем отношение это ближе к единице.

12. Для исследования формы получаемого выпрямленного тока я пользовался трубкой Брауна. Как известно, трубка эта есть видоизменение круксовой трубки. На пути катодных лучей, идущих вдоль оси трубки Брауна, помещается стеклянный экранчик с маленьким отверстием. Экран этот пропускает только тонкий пучок катодных лучей, который падает на фосфоресцирующий экран и производит на нем светящийся след. Катушка из изолированной проволоки, по которой проходит исследуемый ток, располагается так, чтобы ось ее была нормальна к оси трубки.

Под влиянием изменяющегося магнитного поля, создаваемого катушкой, катодный пучок будет претерпевать бóльшие или меньшие отклонения в ту или другую сторону. Благодаря таким колебаниям катодного пучка светящийся след на фосфоресци-

рующем экране будет иметь вид линии. Рассматривать эту линию надо через посредство вращающихся зеркал, применяемых обычно при акустических исследованиях. При этом ось вращения системы зеркал должна быть нормальна к оси трубки и параллельна той плоскости, в которой совершаются колебания катодного пучка. При таком расположении приборов светлая линия на экране развернется для наблюдателя в кривую, которая в значительной степени приближается к кривой тока, проходящего по катушке. Для образования катодного пучка я пользовался обычной электростатической машиной, полюса

Рис. 4.

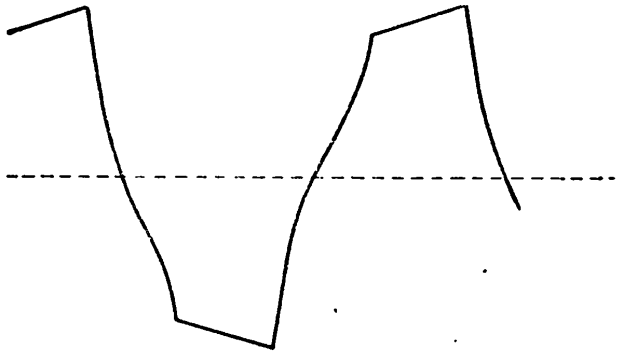


Рис. 5.

которой присоединялись к электродам трубки. Кроме того, полезно анод присоединить к земле.

13. При работе с одним алюминиевым выпрямителем, включенным в цепь, как показано на рис. 1, отношение действующей силы тока к средней за полный период обыкновенно бывало около 1.7.

Получаемая при этих условиях форма кривой выпрямленного тока показана на рис. 4. На рис. 5 показана форма кривой разности потенциалов у зажимов цепи переменного тока, получаемого от Василеостровской электрической станции инженера Н. В. Смирнова. Кривая, изображенная на рис. 4, и все последующие кривые выпрямленного тока получены с током от той же станции инженера Смирнова.

Как показал опыт, при этой простейшей схеме можно получить в форме постоянного тока более 40% энергии, измеряемой ваттметром у зажимов схемы.

Что же касается отношения действующей силы тока к средней за целый период, то оно больше 1.57 по двум причинам. Во-первых, мы имеем обыкновенно дело не с синусоидальным током и, во-вторых, как видно на рис. 4, по цепи проходит ток и одного, и другого направления; разница только в амплитудах. Так, впрочем, и должно быть с нашей точки зрения.

Если действительно процессы, совершающиеся у алюминиевого электрода, обусловливаются большой плотностью тока, то не может быть речи о полном задерживании тока по одному направлению. Должна только быть разница между количествами электричества, проходящими по обоим направлениям.

Рассматриваемая простейшая схема применима для зарядки аккумуляторов от цепи переменного тока. Во многих случаях, несмотря на сравнительно малую отдачу схемы, выгоднее применить ее, чем устанавливать особый вращающийся трансформатор или посылать аккумуляторы для зарядки на станции постоянного тока. Это в особенности справедливо относительно лабораторной практики, когда и без того не всегда приходится заряжать аккумуляторы при условиях наибольшей экономичности.

Рис. 6.

В физической лаборатории С.-Петербургских Высших женских курсов уже более года тому назад был введен этот способ зарядки аккумуляторов от цепи переменного тока; при этом полученные результаты в высшей степени удовлетворительны, как в отношении удобства, так и в отношении экономичности.

На рис. 6 показана форма выпрямленного тока во время зарядки этим током 24 последовательно соединенных аккумуляторов. Средняя сила тока была равна 1.5 а. Отношение действующей силы тока к средней равно было 1.8.

14. Во многих случаях может быть желательно, чтобы выпрямленный ток был более похож на обычный постоянный ток, чем, например, ток, форма которого показана на рис. 4. Это не постоянный ток в полном смысле этого слова, а ток пульсирующий постоянного направления. При этом максимальная сила тока бывает раза в три, четыре больше средней силы тока за полный период.

Таким образом, мы можем сказать, что нередко желательно иметь такой выпрямленный ток, в котором относительная разница между максимальной и средней силами тока была бы возможно меньше (при абсолютно постоянном токе она равна нулю).

Принципиально этот вопрос можно считать вполне разрешенным при применении особой буферной батареи аккумуляторов, включаемой в цепь параллельно полезному сопротивлению. Эта батарея будет заряжаться в то время, когда разность

потенциалов в цепи будет выше разности потенциалов у зажимов батареи, и будет разряжаться на полезное сопротивление, когда внешняя разность потенциалов в цепи упадет и ток должен был бы на момент прекратиться.

Таким образом, времена заряда и разряда такой батареи будут выражаться в частях времени полного периода переменного тока. Следовательно, емкость описываемой буферной батареи может быть ничтожно мала и измеряться лишь несколькими ампер-секундами. Из этого еще нельзя заключить, что и размеры этих аккумуляторов могут быть очень незначительны.

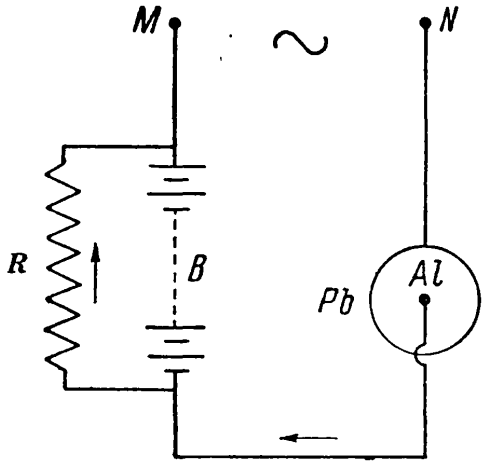


Рис. 7.

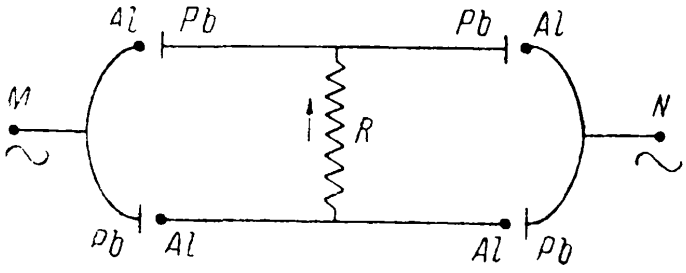


Рис. 8.

Дело в том, что внутреннее сопротивление буферной батареи аккумуляторов не должно быть очень велико, в противном случае, будет очень велико падение напряжения внутри батареи и она будет неудовлетворительно исполнять роль буфера.

На рис. 7 показана простейшая схема с буферной батареей. Здесь *M* и *N* — зажимы переменного тока, *Al*, *Pb* — выпрямитель, *B* — буферная батарея аккумуляторов, *R* — полезное сопротивление.

15. До сих пор мы имели дело со схемами, позволяющими пользоваться лишь одной половиной переменного тока. Ясно, конечно, что непосредственно мы ничего не теряем, не воспользовавшись и другой половиной тока. Но все-таки выгоднее было бы воспользоваться обоими направлениями. Дело в том, что в первом случае отношение действующей силы тока к средней за целый период, как выше сказано, бывает около 1.7—1.8. Счетчик, по которому мы платим за энергию, показывает величины, пропорциональные действующей силе тока. Нас же при утилизации выпрямленного тока интересует обыкновенно средняя сила тока.

Таким образом, надо стремиться, чтобы отношение действующей и средней сил тока было возможно ближе к единице. Тогда мы достигнем наибольшей возможной экономичности.

С этой целью применяют схемы, позволяющие утилизировать оба направления переменного тока. Такова известная схема Греца, изображенная на рис. 8. Неудобство этой схемы

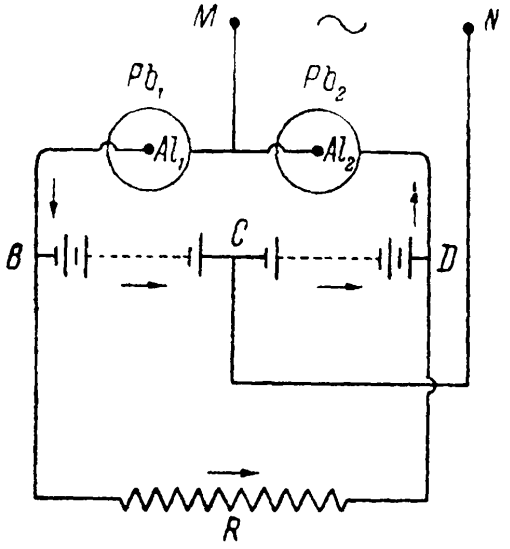


Рис. 9.

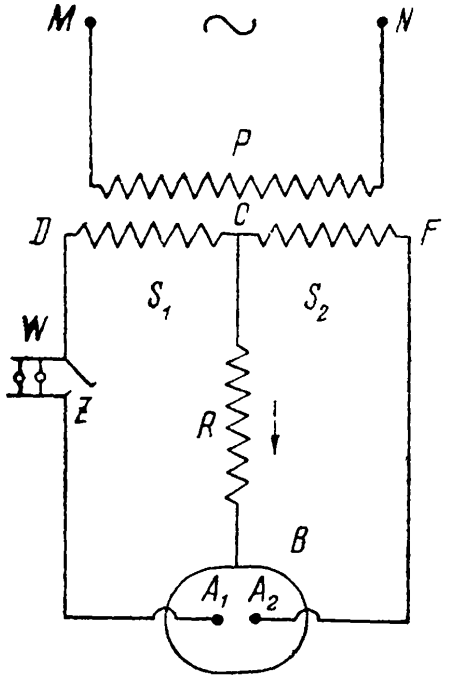


Рис. 10.

состоит, во-первых, в необходимости пользоваться минимум четырьмя выпрямителями и, во-вторых, в том, что при этой схеме ток должен проходить последовательно минимум через два выпрямителя. Второе обстоятельство важно в том отношении, что выпрямитель является местом известных потерь, уменьшить которые весьма желательно. Ниже мы даем ряд схем, в которых число необходимых выпрямителей сведено до минимума.

16. На рис. 9 изображена схема с буферной батареей, позволяющая воспользоваться обоими направлениями переменного тока и требующая только двух выпрямителей. Здесь M и N — зажимы переменного тока, Pb_1, Al_1 и Pb_2, Al_2 — алюминиевые выпрямители. Pb_1 присоединен к Al_2 и к зажиму M. Два другие электрода: Al_1 и Pb_2 — присоединены к концам B и D буферной батареи аккумуляторов. Второй зажим N присоединяется к середине батареи в точке C. Нетрудно понять, что ток будет поочередно пробегать то через правую половину батареи, то

через левую и всегда так, как показано на схеме стрелками. Полезное сопротивление R присоединено к точкам B и D. При этой схеме можно иметь между точками B и D довольно значительную постоянную разность потенциалов. При 100 в переменного тока у зажимов M и N можно получить между B и D постоянную разность потенциалов более 120 в.

17. Пользуясь особым трансформатором, можно составить очень удовлетворительно работающую схему, утилизирующую оба направления. Подобная схема представлена на рис. 10. M и N — зажимы переменного тока, приключенные к первичной обмотке трансформатора P. Две тождественные секции вторичной обмотки S_1 и S_2 соединены последовательно. Точки D и F присоединены к двум алюминиевым электродам A_1 и A_2, помещенным внутри общего свинцового электрода B. Полезное сопротивление R включается между B и C. Так как при работе этой схемы разность потенциалов между A_1 и A_2 довольно значительна (она та же, что и между D и F), то вначале в цепь, ведущую к одному из алюминиевых электродов, включается ламповый реостат W, состоящий из одной или двух ламп. Он служит для того, чтобы ослабить тот переменный ток, который, в первое время по замыкании тока, проходит по цепи DWA_1A_2F.

Если цепь CB разомкнута, то по быстрому затуханию ламп W можно судить о том, что алюминиевые электроды уже успели покрыться изолирующим слоем, уменьшающим действующую поверхность, и переменный ток в цепи DWA_1A_2F прекратился. Тогда замыкают ключ Z и таким образом ламповый реостат W выключается из цепи. Необходимо, впрочем, оговориться, что предварительное введение лампового реостата W желательно и полезно только тогда, когда мы имеем дело со свежими или давно не работавшими электродами. Если же электроды недавно еще работали, то можно не включать предварительно реостата W.

При работе схемы по проводнику CB течет ток постоянного направления, как показано на рис. 10 стрелкой.

Можно устроить несколько иначе подобную же схему, дающую ток того же качества. Именно, можно вместо трансформатора PS_1S_2 взять две последовательно соединенные секции одной и той же реактивной катушки и тогда получится схема, изображенная на рис. 11. S_1 и S_2 — две секции реактивной катушки, намотанные на один и тот же железный сердечник. Прочие части схемы те же, что и на рис. 10.

18. Как выше сказано, схемы, изображенные на рис. 10 и 11, дают возможность воспользоваться обоимы направлениями переменного тока. Нетрудно видеть, что в случае схемы, изображенной на рис. 10 обмотки S_1 и S_2 работают по очереди: в течение одного полупериода работает, например, обмотка S_1, в течение следующего полупериода — обмотка S_2. Обмотка S_1 работает в цепи DA_1BRC, обмотка же S_2 — в цепи FA_2BRC. При этом в обоих случаях по цепи CB будет протекать ток одного и того же направления.

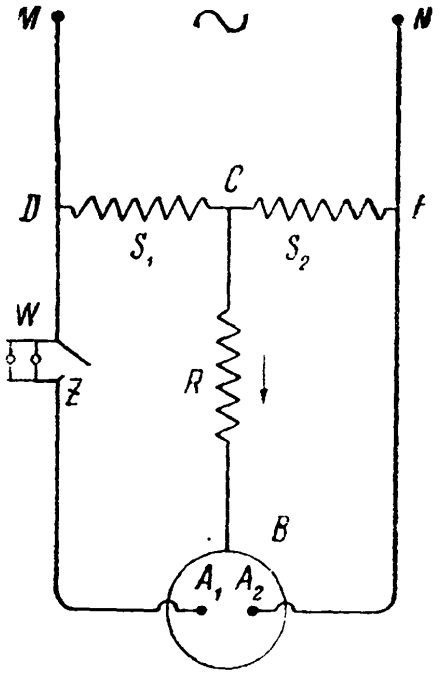


Рис. 11.

Подобным же образом, в случае схемы, изображенной на рис. 11, в течение одного полупериода ток идет по пути MDS_1CRBA_2FN,

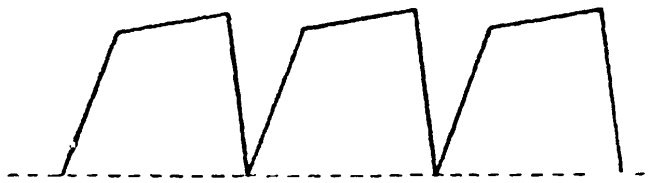


Рис. 12.

в следующий же полупериод ток пройдет по пути NFS_2CRBA_1DM. В обоих случаях по цепи CB ток течет по тому же направлению.

При опытах в цепь CB включались тепловой и магнитоэлектрический амперметры. Отношение действующей силы тока к средней равно приблизительно 1.25. Из этого уже видно, что мы имеем дело с током более близким к обычному постоянному, чем это было при простой схеме, изображенной на рис. 1, когда это же отношение было около 1.7. Форма кривой тока, исследованная посредством трубки Брауна, представлена на рис. 12.

Для того, чтобы еще больше приблизиться к обычному постоянному току, чтобы, следовательно, сила тока не падала до нуля, можно ввести в цепь CB буферную батарею. Но можно поступить еще проще и получить весьма хорошие результаты. Стóит только ввести в цепь CB катушку с малым омическим сопротивлением, но с очень большим коэффициентом самоиндукции. Магнитный поток, создаваемый этой катушкой, служит прекрасным аккумулятором энергии, которая запасается, когда электродвижущая сила в цепи велика. За счет энергии

магнитного потока ток поддерживается, когда внешняя электродвижущая сила в цепи *CB* падает до нуля. Таким образом, введением очень большой самоиндукции можно сделать колебания тока сколь угодно малыми и получить обычный постоянный ток.

При введении самоиндукции в цепь *CB*, показания теплового и магнитоэлектрического приборов сближаются. Для примера мы приведем данные, полученные со схемой, изображенной на рис. 11, при введении в цепь *CB* стовольтовой обмотки трансформатора в 4 квт. При этом разность потенциалов у зажимов *M* и *N* равна была 110 в, у зажимов же каждой из секций S_1 и S_2 — от 70 до 90 в.

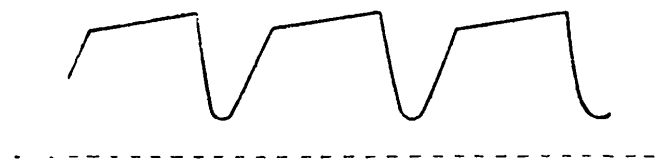


Рис. 13.

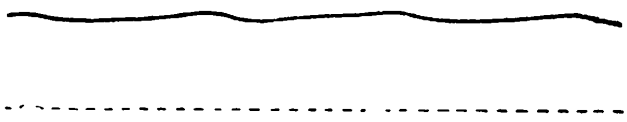


Рис. 14.

Показания теплового амперметра .	0.78	1.20	1.52	1.90	2.25	2.53	2.83
Показания магнитоэлектрического амперметра	0.75	1.15	1.50	1.85	2.20	2.50	2.75

Данные эти (в амперах) получены при переменном токе от сети общества «Гелиос».

При исследовании формы кривой тока брауновской трубкой ясно видно, что при введении в цепь *CB* катушки со сравнительно небольшим коэффициентом самоиндукции ток уже не падает до нуля, как на рис. 12, а получается картина, подобная тому, что изображено на рис. 13. При больших коэффициентах самоиндукции получается картина, представленная на рис. 14.

Как показал опыт, при работе со сложной схемой можно получить в форме постоянного тока более 50% энергии, измеряемой ваттметром у зажимов переменного тока.

19. В схеме, изображенной на рис. 11, секции S_1 и S_2, намотанные на один и тот же железный сердечник, могут быть с успехом заменены двумя отдельными реактивными катушками. Схема работает очень хорошо. При этом оказывается, что мы сразу, не вводя никакой самоиндукции в цепь *CB*, получаем ток подобный тому, что представлено на рис. 13, т. е. ток никогда не падает до нуля. Причина этого явления лежит в том, что в данном случае в каждой из реактивных катушек

создается магнитный поток, постоянный по направлению и играющий ту же роль, что магнитный поток в катушке, вводимой в цепь CB.

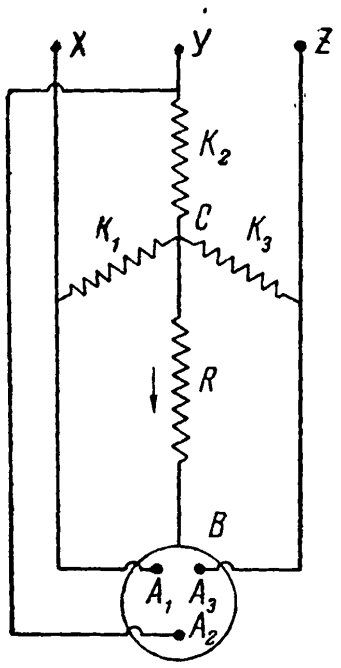


Рис. 15.

При опыте в качестве реактивных катушек были применены стовольтовые обмотки гелиосовских трансформаторов для дуговых ламп. При 110 в у зажимов каждой из этих обмоток через нее идет всего около 0.5 а переменного тока. При работе с алюминиевым выпрямителем пульсирующий ток постоянного направления не встречает в них столь же значительного кажущегося сопротивления: в цепи CB можно получить ток значительной силы.

20. В случае трехфазного тока можно совместить все три выпрямленных тока и, таким образом, получить ток весьма близкий к постоянному. Для этой цели применима схема, изображенная на рис. 15. Здесь X, Y и Z — зажимы трехфазного тока; K_1, K_2 и K_3 — отдельные реактивные катушки; A_1, A_2 и A_3 — три алюминиевых электрода, помещенных внутри общего цилиндрического свинцового электрода B. Полезное сопротивление R включается между C и B. Постоянный ток пойдет по направлению, указанному на схеме стрелкой.

Литература

[1] Грец Л., Электричество, № 23—24, 1897, стр. 338.

К ВОПРОСУ ОБ ОБРАТНОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЕ ВОЛЬТОВОЙ ДУГИ

ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 5, 1902, стр. 223—228.

1. Со времени возникновения гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги различные исследователи неоднократно пытались непосредственным опытом подтвердить эту гипотезу. Допуская ее, мы должны предположить, как это сделал впервые Эдлунд[4], что после размыкания тока, питающего дугу, разность потенциалов между ее электродами не может мгновенно падать до нуля. Если, следовательно, прервав ток в цепи дуги, мы соединим ее электроды с каким-либо гальванометром, то через него должен пройти ток, аналогичный току поляризационному. Такова в общих чертах схема главнейших опытных попыток подтверждения гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги.

Первоначальные опыты дали положительные результаты. Однако по мере совершенствования методов наблюдения становилось очевидно, что эти результаты никоим образом не могут считаться убедительными, ибо в постановке опытов были допущены существенные недостатки: в большинстве случаев изоляция была несовершенна и в гальванометр попадал ток от главной цепи. Ясно, конечно, что это обстоятельство могло сильно исказить результаты наблюдений. Одним словом, по мере совершенствования методов исследования наблюдаемая обратная электродвижущая сила дуги оказывалась все меньше и меньше.

Наконец, последние исследования Блонделя[1] как будто бы совершенно идут вразрез с гипотезою об обратной электродвижущей силе дуги. В этих опытах ток, питающий дугу, периодически прерывался при посредстве специального вращающегося коммутатора. Пока главный ток был разомкнут, этот же коммутатор присоединял на момент цепь гальванометра к электродам

дуги. Промежуток времени, протекавший от размыкания главного тока до замыкания цепи гальванометра, был приблизительно равен $\frac{1}{600}$ сек. Блондель не обнаружил никакой обратной электродвижущей силы, которая могла бы быть сравнима с разностью потенциалов между электродами горящей дуги. На основании своих опытов Блондель полагает, что вольтова дуга эквивалентна простому омическому сопротивлению, и само

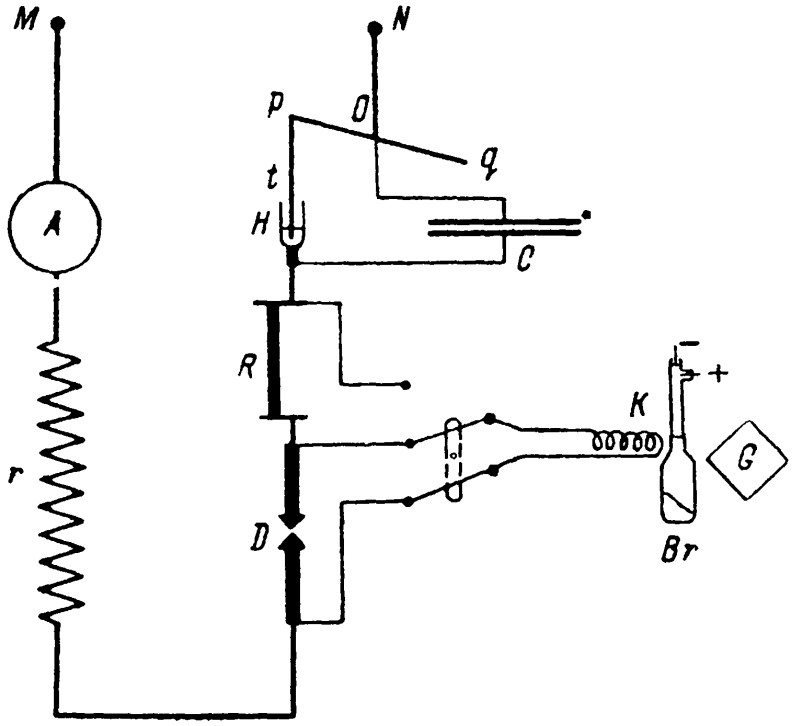


Рис. 1.

существование обратной электродвижущей силы в дуге он считает немыслимым.

2. Есть, однако, некоторые основания предполагать, что физические условия в вольтовой дуге изменяются после размыкания тока чрезвычайно быстро, и потому мне казалось интересным обследовать то, что происходит в течение $\frac{1}{600}$ сек. после размыкания тока в дуге, т. е. в течение того промежутка времени, когда в опытах Блонделя обратная электродвижущая сила успевала, быть может, упасть до нуля.

Я наблюдал кривую разности потенциалов между электродами дуги, через которую проходил прерывчатый ток постоянного направления.

Приборы были у меня расположены так, как показано на рис. 1. Здесь M и N — зажимы от сети постоянного тока (110 в), A — амперметр, r — сопротивление для регулирова-

ния силы тока, D — вольтова дуга, R — угольное сопротивление (безиндукционное); H — стакан со ртутью, поверх которой было налито вазелиновое масло, pq — металлический рычаг, совершавший в секунду приблизительно 15 качаний около точки O и производивший периодические размыкания и замыкания тока при посредстве вертикального придатка pt; K — катушка из тонкой проволоки, присоединяемая при помощи особого переключателя параллельно D или R, Br — трубка Брауна, G — вращающиеся зеркала.

Меня интересовала, главным образом, та часть кривой разности потенциалов, которая соответствует моменту размыкания тока. При этом было важно производить прерывания тока возможно резче. С этой целью приходилось включать параллельно искре размыкания конденсатор C, наивыгоднейшая емкость которого изменялась от 2 до 5 мкф в зависимости от силы тока. Эта последняя в периоды замыкания достигала 10—20 а.

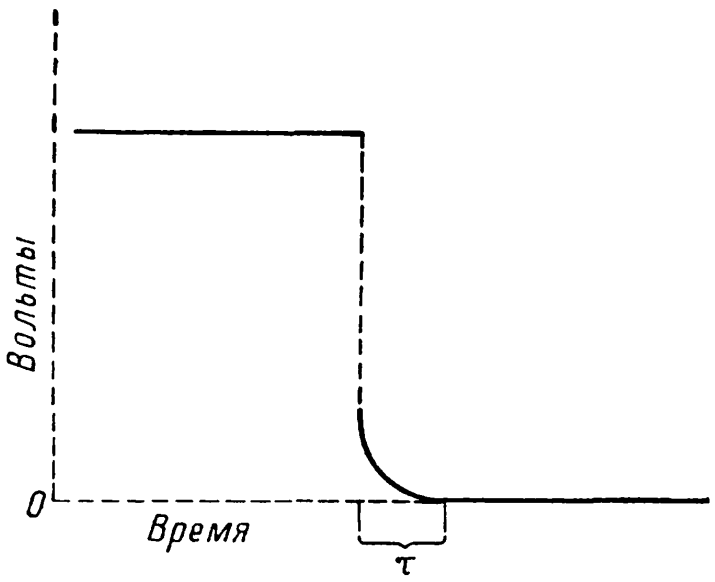


Рис. 2.

Для облегчения наблюдений я сравнивал кривую разности потенциалов между электродами дуги D с кривою разности потенциалов у концов угольного безиндукционного сопротивления R. В последнем случае я, собственно говоря, прямо наблюдал кривую силы тока в цепи вольтовой дуги. В обоих случаях части кривых, близкие к моменту размыкания тока, казались совершенно тождественными, насколько можно было судить по непосредственному наблюдению. Интересующий нас участок кривых представлялся в виде, показанном на рис. 2.

Я не мог достигнуть мгновенного размыкания тока. Промежуток времени τ, в течение которого происходило полное размыкание тока, был порядка десятитысячной секунды. Зеркала G в моих опытах вращались с такою скоростью, что подобные промежутки времени были вполне доступны наблюдению. Очень трудно было судить о сходстве или различии кривых в самый момент резкого изменения силы тока. Можно только сказать, что по прошествии промежутка вре-

мени порядка 0.0001 сек. после начала размыкания я уже не замечал никакого различия между кривой силы тока, проходящего через дугу, и кривой разности потенциалов между ее электродами.

В качестве электродов дуги я применял угли (в 10 мм диаметром) с фитилем и без фитиля, а также медные и железные стержни (в 5 мм диаметром).

Итак, полученные мною результаты отличаются от результатов опытов Блонделя только в том отношении, что мне удалось повысить до 0.0001 сек. предел малости того промежутка времени, по прошествии которого после размыкания тока вольтова дуга кажется эквивалентной простому омическому сопротивлению.

3. Я обращаю особенное внимание на то обстоятельство, что отрицательные результаты опытов Блонделя и моих никоим образом не должны быть рассматриваемы как довод против основательности гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги.

Как я уже упоминал выше, есть основание полагать, что физические условия, от которых должна зависеть обратная электродвижущая сила дуги, чрезвычайно быстро изменяются вслед за изменениями в силе тока. Дудделль[2] показал для случая 8-амперной дуги постоянного тока между углями без фитиля, что в силе света этой дуги ясно заметны колебания, когда на главный ток налагается переменный с амплитудой всего в 3% главного тока и с частотой в 4300 пер./сек.; при этом максимум силы света отстает от максимума силы тока менее, чем на 0.0001 сек. Колебания в силе света, испускаемого вольтовой дугой, должно рассматривать как следствие колебаний температуры дуги и концов электродов.

Таким образом, опыты Дудделля показывают, что физические условия вольтовой дуги (температуры отдельных элементов дуги) чрезвычайно быстро следуют за изменениями силы тока.

По мнению Дудделля [3], обратная электродвижущая сила вольтовой дуги есть разность двух электродвижущих сил термического характера, возникающих в местах соприкосновения раскаленной газообразной среды дуги с концами электродов. Такое представление вполне согласуется с опытными данными.

В этом отношении интересна кривая, построенная мною на основании опубликованных Дудделлем данных и показанная

на рис. 3. Кривая представляет собою падение потенциала вдоль вольтовой дуги (длина дуги в этом случае равна была 6 мм, электроды — угли без фитиля). Форму этой кривой можно объяснить только как следствие существования двух вышеупомянутых электродвижущих сил, направленных в этом случае от накаленного газа к углям. При этом более нагретому электроду соответствует большая электродвижущая сила. Разность этих электродвижущих сил и есть то, что практически получают, измеряя обратную электродвижущую силу вольтовой дуги.

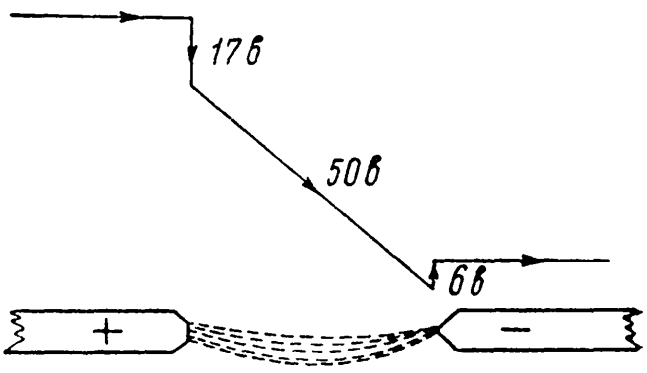


Рис. 3.

На основании вышеизложенного понятно, что после размыкания тока, питающего дугу и обусловливающего разность температур между положительными и отрицательными электродами ее, эта разность температур должна очень быстро уменьшаться. А раз только она сделается равной нулю (это, повидимому, происходит в промежуток времени, меньший 0.0001 сек.), электродвижущая сила термопары «уголь—газ—уголь» также будет равна нулю, и мы получим отрицательный результат, пытаясь ее обнаружить.

Таким образом, опыты Блонделя и мои дали отрицательные результаты по всей вероятности не потому, что гипотеза об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги неосновательна, а потому, что методы наши были недостаточно совершенны.

Литература

[1] Blondel A., Comptes Rendus, t. CXXV, 1897.
[2] Duddell, Journ. of the Inst. of El. Eng., 1901, February.
[3] Duddell, Electrician, № 1220, 1901, October.
[4] Edlund E., Ann. der Physik und Chemie (Pogg. Ann.), Bd. CXXXIV, 1868.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ «ПОЮЩЕЙ» ВОЛЬТОВОЙ ДУГИ

ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 5, 1902, стр. 229—232

1. Для того, чтобы воспроизвести опыт Дудделля с «поющей» вольтовой дугой, необходимо располагать довольно значительной емкостью. В тех случаях, когда почему-либо нельзя применить обычные дорогостоющие конденсаторы, я предлагаю пользоваться алюминиевым конденсатором, устройство которого в высшей степени просто.

Подобно алюминиевому клапану он состоит из алюминиевого электрода, погруженного в 7—8%-й раствор двууглекислой соды. Поверхность алюминия электролитически покрывается тончайшим слоем окиси или гидрата окиси алюминия, представляющим собою весьма дурной проводник; таким образом, в нашем конденсаторе обкладками служат алюминий и проводящая жидкость, разделенные этим слоем.

Алюминиевый электрод приготовленного мною конденсатора имеет приблизительно следующие размеры: толщина — 1 мм, длина — 25 см, ширина — 12 см. Две пластины из листового железа таких же точно размеров помещаются по сторонам алюминиевой и отделяются от нее тонкими резиновыми прокладками, так что расстояние между алюминиевой и каждой из железных пластин не превосходит 3 мм. Вся система стягивается в двух-трех местах бечевкой или резиновыми кольцами и помещается в сосуд с раствором соды. Ясно, конечно, что обе железные пластины соединяются металлически одна с другой. Емкость такого конденсатора с действующей поверхностью около 5 дм^2 по приблизительным измерениям оказалась порядка 100 мкф. Такая большая величина емкости должна быть объяснена тем обстоятельством, что изолирующий слой в нашем конденсаторе чрезвычайно тонок.

Описанный мною конденсатор должен присоединяться к цепи источника постоянного тока таким образом, чтобы алюминий был плюсом, в противном случае изолирующий слой сходит с поверхности алюминия.

На рис. 1 показана схема Дудделля с алюминиевым конденсатором.

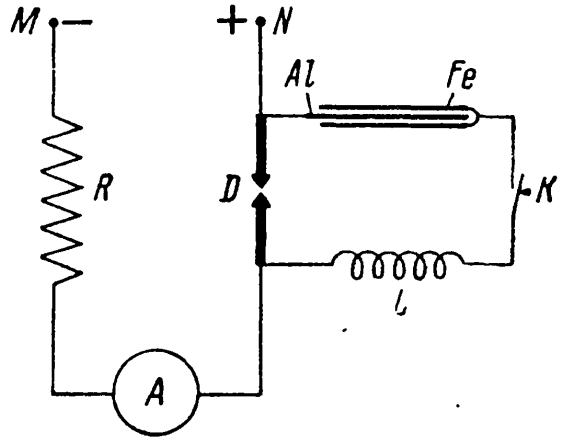


Рис. 1.

Здесь: *M* и *N* — зажимы от цепи постоянного тока (полезно иметь не менее 100 в), *R* — добавочное сопротивление, *A* — амперметр, *D* — вольтова дуга (электроды — обязательно угли без фитиля), *Al Fe* — алюминиевый конденсатор (алюминиевый электрод присоединен к положительному углю), *K* — ключ для замыкания тока в цепи конденсатора, *L* — катушка без железного сердечника, состоящая из нескольких десятков витков толстой изолированной проволоки.

Сопротивление цепи конденсатора вообще должно быть возможно меньше. В опытах с вышеописанным конденсатором я пускал через вольтову дугу ток силой от 4 до 6 а.

Если алюминиевый электрод конденсатора еще не покрыт изолирующим слоем, то, не зажигая дуги, замыкают ключ *K* (рис. 1). Тогда через «конденсатор» пойдет ток, силу которого подрегулировывают таким образом, чтобы на 1 дм² поверхности алюминиевого электрода приходилось около 1 а. Через несколько минут ток сам собою начнет сильно ослабевать, что будет свидетельствовать об образовании изолирующего слоя. Наконец, ток через конденсатор почти совершенно прекратится (будет проходить не более 0,1 а при 100 в) и тогда можно начинать опыт с вольтовой дугой.

Во время опыта можно весьма просто уменьшать емкость конденсатора: для того стоит только более или менее вынимать электроды из жидкости.

По окончании опыта не следует хранить электроды погруженными в жидкость. Проще всего, вынув их, обильно омыть водой, затем высушить или обтереть не жирной тряпкой (в последнем случае приходится совершенно разбирать конденсатор, что, впрочем, нехитро).

2. Алюминиевый конденсатор может с успехом заменять обычный конденсатор и во многих других случаях, между прочим, во всех схемах «говорящей» вольтовой дуги.

Совместно с Ф. Н. Индриксоном и В. А. Кашерининовой я испытывал алюминиевый конденсатор в цепи «говорящей» вольтовой дуги, схема которой, одна из наиболее применяемых, показана на рис. 2.

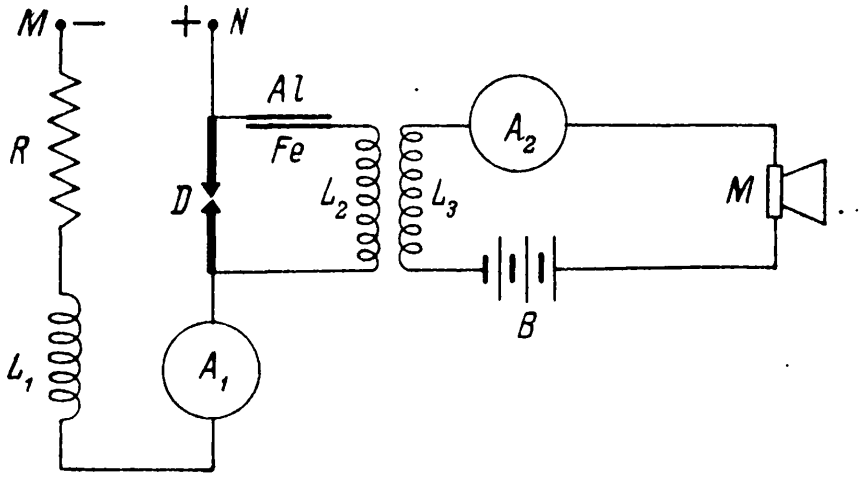


Рис. 2.

Здесь M и N — зажимы от цепи постоянного тока, R — добавочное сопротивление, L_1 — реактивная катушка (с большим коэффициентом самоиндукции), A_1 — амперметр, D — вольтова дуга между углями с фитилем (длина дуги должна быть возможно больше), $Al|Fe$ — алюминиевый конденсатор, L_2 и L_3 — две катушки, навитые на общем сердечнике (из проволок), B — батарея из нескольких аккумуляторов, A_2 — амперметр, M — микрофон с небольшим сопротивлением.

Число витков катушек L_2 и L_3 было в нашем опыте одно и то же (около 300). Проволока в этих катушках около 2 мм диаметром. Длинный железный сердечник имеет около 5 см диаметром.

В дугу мы посылали ток силою от 10 до 15 а; в цепи микрофона сила тока была около 1.5 а.

Поверхность алюминиевого электрода конденсатора была в нашем опыте около 1 дм^2. Дуга «говорила» так же хорошо, как при обычном конденсаторе в 20 мкф.

О ВОЛЬТОВОЙ ДУГЕ

Изв. СПб. политехн. инст., т. 4, в. 1—2, 1905, стр. 5—75

I. Природа вольтовой дуги

1. Как известно, вольтова дуга представляет собой особый случай прохождения электрического тока через газообразную среду. Общие условия, при которых она может возникать и поддерживаться, хорошо всем известны и потому мы здесь на них останавливаться не будем.

По сравнению с другими видами электрического разряда через газ вольтова дуга характеризуется очень сильными тепловыми процессами. В случае угольных электродов в воздухе главное выделение тепла происходит на положительном электроде. В том месте, где этот электрод соприкасается с дугой, т. е. на поверхности так называемого «кратера», происходит испарение угля. Что касается отрицательного электрода, то на нем выделяется сравнительно небольшое количество тепла. Однако всегда место соприкосновения катода с дугой бывает накалено до температуры весьма значительной. В дальнейшем мы покажем, что это обстоятельство имеет особенно важное значение в вольтовой дуге.

2. Так как в вольтовой дуге мы имеем дело с разрядом через газообразную среду между накаленными электродами, то само собою разумеется, что рассмотрение простейших случаев разряда, в которых фигурируют накаленные электроды, может повести к уразумению общего характера происходящих в дуге процессов.

В этом отношении интересно остановиться на так называемом «явлении Эдисона». Как известно, явление это состоит в следующем.

Предположим, что ABC (рис. 1) представляет угольную нить лампочки накаливания и что внутри этой петли помещена

изолированная металлическая пластинка. Если теперь положительный конец A угольной нити соединить с проволокой D, идущей от металлической пластинки, и если между A и D включить гальванометр, то через него протекает довольно значительный ток, который в опытах Флеминга доходил до 3—4 ма. При этом ток идет через гальванометр в направлении от A к D. Если, однако, металлическая пластинка соединена через гальванометр с отрицательным электродом лампы, то ток в этой цепи оказывается в высшей степени слабым по сравнению с тем, что наблюдалось в предыдущем случае.

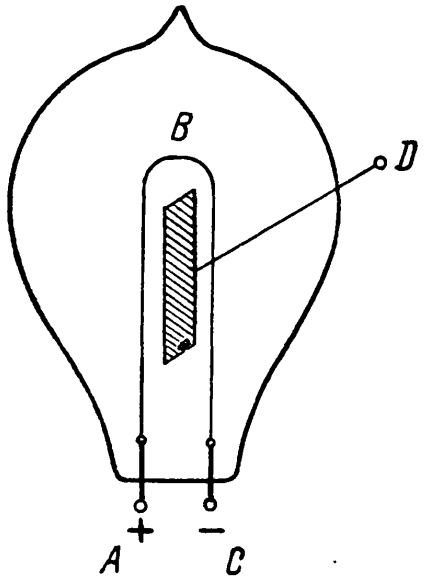


Рис. 1.

Все происходит так, как будто бы от отрицательной ветви угольной нити весьма легко отделяется отрицательное электричество, и в то же время от положительной ветви электричество совсем не отделяется или отделяется в весьма незначительном количестве. Благодаря этому потенциал металлической пластинки должен лишь мало отличаться от потенциала отрицательной ветви угольной нити, между тем как разность потенциалов между положительной ветвью и пластинкой должна быть почти равна разности потенциалов между электродами лампы; следовательно, ток в цепи, соединяющей положительный электрод с металлической пластинкой должен быть во много раз больше, чем в случае цепи, соединяющей пластинку с отрицательным электродом.

Флеминг показал, что явление Эдисона почти совершенно исчезает в том случае, когда отрицательная ветвь угольной петли окружена цилиндром, сделанным из какого-либо металла или из изолирующего вещества. Он нашел также, что электрический ток от некоторого источника может проходить через разреженное пространство между накаленным угольным электродом, играющим роль катода, и холодным электродом — анодом; в обратном же направлении ток не идет.

3. Резкое различие в рассеянии положительного и отрицательного зарядов с накаленного проводника наблюдается в весьма разреженном пространстве; при атмосферном же давлении газа, окружающего проволоку, такого различия обыкновенно не наблюдают: снимаются как положительный, так и отри-

цательный заряды. Во всяком случае наблюдается сильное ослабление явления Эдисона.

Дж. Дж. Томсон следующим образом объясняет ([27], стр. 170) уменьшение рассеяния отрицательного электричества с накаленных тел, окруженных газом. Когда давление газа, окружающего накаленную проволоку, достаточно велико, частицы, заряженные отрицательным электричеством, встречают значительное сопротивление в своем движении, скопляются вблизи поверхности излучающего их накаленного тела и некоторые из них диффундируют обратно в него.

Таким образом, при прочих равных условиях ток отрицательного электричества от накаленного металла или угля в атмосфере газа должен быть значительно меньше, чем в пустоте, или, другими словами, в атмосфере газа нужно располагать значительно большей разностью потенциалов для того, чтобы получить в явлении Эдисона ток такой же силы, что и в пустоте. Например, по расчету Дж. Дж. Томсона в весьма разреженном пространстве нужно располагать разностью потенциалов порядка 100 в для того, чтобы получить ток отрицательного электричества в 1 ма на см^2 поверхности накаленной добела платиновой пластинки, отстоящей на 1 см от холодной; а чтобы получить такой же силы ток в газе при атмосферном давлении, надо располагать разностью потенциалов, большей 3300 в.

Что касается снятия положительного заряда с накаленных проводников, то явление это, весьма слабо обнаруживающееся в пустоте, в среде газа значительно усиливается. Весьма вероятно, что в данном случае мы имеем дело с результатом ионизации газа вблизи накаленного проводника.

В пустоте с увеличением температуры накаленного тела рассеяние отрицательного электричества возрастает чрезвычайно быстро. В виду этого я предположил, что и в газе, присутствие которого благоприятствует рассеянию положительного электричества, удастся получить во много раз большее рассеяние отрицательного электричества с накаленного проводника, если только достигнуть достаточно высокой температуры. Мне удалось убедиться, что в действительности дело происходит именно так, т. е. и при атмосферном давлении явление Эдисона может быть наблюдаемо весьма отчетливо, надо только располагать достаточно высокой температурой [4].

4. Первый опыт был поставлен следующим образом. Вертикальная стеклянная трубка T (рис. 2) была закрыта двумя пробками K_1 и K_2. Сквозь пробку K_1 проходили трубочка, под-

водившая водород под давлением, несколько превышавшим атмосферное, и проволока, оканчивавшаяся внутри трубки T угольком C. Последний в нижней своей части имел в диаметре около 1 мм. В пробку K_2 были вставлены отводная трубочка для водорода, который далее сжигался для контроля, и проводники, подводившие ток к угольной нити AB длиной около 10 мм. Нить эта представляла собой часть нити от лампочки накаливания, развивавшей 50 св при 100 в. Диаметр этой нити был равен приблизительно 0.25 мм. Расстояние между концом угля C и нитью AB было около 0.5 мм.

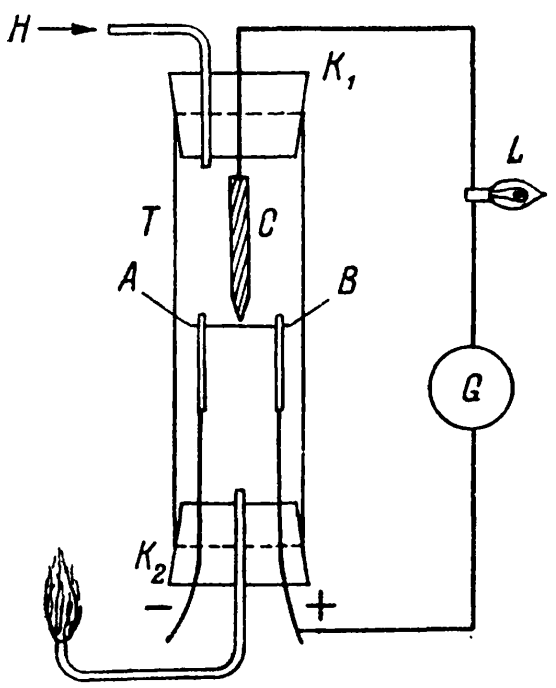


Рис. 2.

Я производил наблюдения в атмосфере водорода, чтобы хоть несколько предохранить угольную нить от быстрого перегорания. Вообще же при тех высоких степенях каления, которых мне приходилось достигать для получения явления Эдисона в атмосфере газа, уголек довольно быстро разрушался и в водороде. Во всяком случае я успевал произвести наблюдения, которые сводились к измерению силы тока в цепи, заключавшей в себе лампочку накаливания L (5 св, 110 в) и гальванометр G.

Цепь эта с одной стороны присоединялась к углю C, игравшему роль пластинки в случае, показанном на рис. 1, а с другой стороны — к положительному или отрицательному электроду нити AB. Для накаливания этой нити в водороде мне приходилось пропускать через нее ток значительно большей силы, чем в том случае, когда она находится в пустоте. При слабом калении нити AB явление Эдисона совсем не заметно или очень мало заметно; но при сильном калении нити (я пропускал через нее ток силой до 5 а) начинает брать перевес то явление, которым обусловливается более интенсивное снятие отрицательного заряда с накаленного тела.

Так, например, при токе через нить AB, равном 5 а, и разности потенциалов $U_A - U_B$ равной 20 в, я наблюдал следующее: если C соединен с (—), то $i = 0.000002$ а, если же C соединен с (+), то $i = 0.004$ а.

Итак, ток через газ между накаленным катодом и холодным анодом был в описываемом опыте в 2000 раз сильнее тока между накаленным анодом и холодным катодом. В обоих случаях разность потенциалов между углем C и противолежащей частью нити AB была около 10 в. Если предположить, что электричество, переносимое от AB к C, рассеивалось только с той части нити, которая расположена как раз вблизи конца угля C, то можно рассчитать приблизительно плотность тока на поверхности раскаленного проводника.

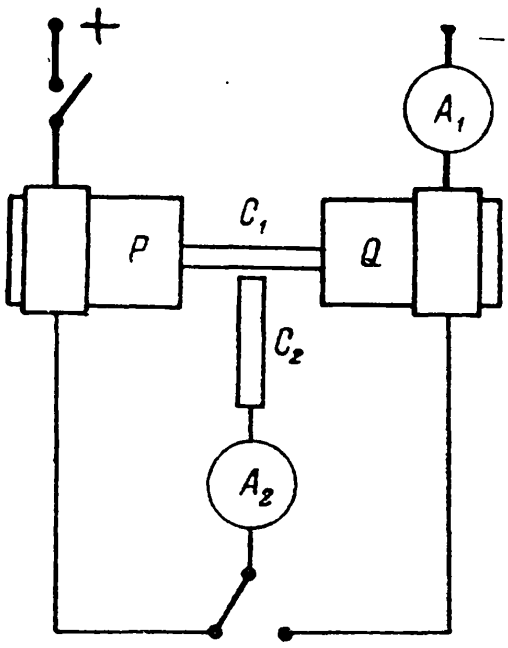


Рис. 3.

Рассеивающую поверхность примем равной 1 мм². В таком случае при рассеянии отрицательного электричества с накаленного угля в водороде (в условиях моего опыта) плотность тока была около 0.4 а на см², а при рассеянии положительного — 0.0002 а на см².

5. В дальнейших опытах мне удалось наблюдать явление Эдисона в воздухе при атмосферном давлении. Приборы при этом располагались следующим образом (рис. 3). P и Q — угольные цилиндры в 15 мм диаметром, снабженные продольными каналами в 3 мм диаметром. В отверстия этих каналов вставлялись концы угольного стержня C_1 диаметром в 3 мм. Стрежень C_1 накаливался током и играл роль угольной нити лампы накаливания в опыте Эдисона. Угольные цилиндры P и Q включались в цепь через посредство надетых на них медных колец. Амперметр A_1 служил для измерения тока, накаливавшего стержень C_1. Угольный стержень C_2 такого же диаметра, что и C_1 располагался против середины угля C_1, так, что расстояние между концом угля C_2 и поверхностью угля C_1 было около 1 мм. Через амперметр A_2 можно было приводить уголь C_2 в сообщение с положительным или отрицательным зажимом цепи PC_1Q. В качестве амперметра A_2 мне служил точный магнитоэлектрический прибор. При помощи этого прибора я мог обнаруживать токи, начиная с 0.2 ма.

Опыт показал, что при слабых степенях каления угля C_1 через A_2 протекал ток силою менее 0.2 ма независимо от того, присоединен ли уголь C_2 к (+), или к (—). Но по мере усиле-

ния тока, протекающего через C_1, т. е. по мере повышения температуры угля C_1 начинало вполне определенно обнаруживаться явление Эдисона. Именно, при соединении C_2 с (—) ток через A_2 попрежнему оставался в пределах от 0 до 0.2 ма, при соединении же C_2 с (+) ток через A_2 последовательно возрастал и доходил в моих опытах до 150 ма.

В табл. 1 приведены более подробные данные.

Таблица 1

№	Длина C_1 в миллиметрах (приблизительно)	Напряжение между P и Q (приблизительно)	Сила тока через A_1 в амперах (приблизительно)	Ток через A_2 в миллиамперах	
				уголь C_2 соединен с (—)	уголь C_2 соединен с (+)
1	25	10	30	0—0.2	0—0.2
2	25	13	40	0—0.2	3
3	25	15	50	0—0.2	20
4	12	15	75	0—0.2	30
5	8	12	100	0—0.2	150

В этих опытах нагревание угля C_1 доходило до яркобелого каления.

А. Л. Гершун показал, что явление Эдисона в воздухе при атмосферном давлении может быть чрезвычайно хорошо наблюдаемо, если в качестве накаливаемой нити воспользоваться стерженьком лампы Нернста. Холодным электродом в этих опытах служил угольный стержень, конец которого в некоторых случаях отстоял на несколько сантиметров от накаленного стерженька лампы Нернста.

6. Целый ряд разных опытов, произведенных Флемингом, Эльстером и Гайтелем и другими, не оставляет никакого сомнения в том, что вообще с накаленных металлов и угля происходит весьма быстрое снятие отрицательного электричества. Дж. Дж. Томсон измерил [29] величину $\frac{e}{m}$ — отношение заряда к массе — для предполагаемых носителей отрицательного заряда, отделяющихся от накаленных тел, и нашел $\frac{e}{m} = 8.7 \cdot 10^6$, что в пределах ошибок опыта совпадает с величинами $\frac{e}{m}$, найденными для катодных лучей.

Одним словом, носителями отрицательного электричества в явлении Эдисона оказываются те же гипотетические электро-

ны, с которыми мы встречаемся в катодных лучах, в актиноэлектрических явлениях и во многих других случаях.

7. Представим себе теперь, что в некоторой цепи с электродвижущей силой существует разрыв проводника. По цепи будет проходить, вообще говоря, очень слабый ток, обусловливаемый ионизацией газа между электродами в месте разрыва. Но если отрицательный электрод будет нагреваться каким-либо способом до достаточно высокой температуры, то на основании изложенного на предыдущих страницах мы можем утверждать, что с поверхности накаленного электрода будет рассеиваться отрицательное электричество, или, другими словами, будут излучаться электроны, которые будут под влиянием электрического поля двигаться к положительному электроду.

Таким образом, в этом случае через промежуток между электродами электричество будет переноситься как ионами, образующимися в газе, так и электронами, излучающимися из накаленного катода. И надо полагать, что чем выше температура катода, тем более преобладающее значение приобретает катодный поток. Но ведь вольтова дуга как раз представляет собой случай, тождественный с только что рассмотренным. Катод вольтовой дуги имеет очень высокую температуру, и потому является в высшей степени вероятным предположение, что основной процесс вольтовой дуги представляет собой поток электронов, исходящих из накаленного катода дуги. С рассматриваемой точки зрения основным условием существования вольтовой дуги является высокая температура катода.

Что касается анода дуги, то его температура принципиально не должна иметь существенного значения. Обыкновенно в вольтовой дуге анод чрезвычайно сильно накаливается. Мы скажем, что анод нагревается потому, что он подвергается бомбардировке со стороны электронов, исходящих из катода мощным пучком и приобретающих в электрическом поле между углями большую скорость.

Таким образом, тепло, развивающееся на аноде дуги мы будем считать эквивалентным кинетической энергии электронов, ударяющихся об анод. В этом отношении существует полное сходство между нагреванием анода дуги и антикатода круксовой трубки (антикатодом называется та часть в трубке, на которую падает пучок катодных лучей, т. е. пучок электронов, исходящих из катода [3].

8. Представленная в предыдущих строках общая схема основного процесса вольтовой дуги вполне соответствует взгля-

дам на природу дуги, изложенным в работах Дж. Дж. Томсона и Штарка, появившихся почти одновременно с моей работой «К вопросу о механизме вольтовой дуги».

Так в своей книге «Прохождение электрического тока через газы» ([27], стр. 425) Дж. Дж. Томсон говорит, между прочим, о вольтовой дуге так: «...отрицательные частицы выходят из катода. Эти частицы, обусловливающие в основном разряд дуги, бомбардируют и накаляют анод. Они также ионизируют (или непосредственно — при столкновении, или косвенно — нагревая анод) газ или пары металла, из которого изготовлен анод, создавая запас положительных ионов, поддерживающих катод горячим».

В этих строках выражена сущность взгляда Дж. Дж. Томсона. Он несомненно связывает картину происходящих в дуге процессов с явлением рассеяния отрицательного электричества с накаленных проводников.

Итак, по Дж. Дж. Томсону, главными носителями тока в вольтовой дуге являются отрицательные корпускулы (так он называет электроны). Они ударяются в анод и тем нагревают его. Нагревание же самого катода, безусловно необходимое для того, чтобы дуга могла существовать, он считает результатом бомбардировки катода со стороны сравнительно небольшого числа положительных ионов, образующихся вдоль пути электронов. Мне кажется, что вопрос о причине высокой температуры катода дуги несколько сложнее. Я коснусь этого в дальнейшем изложении.

Штарк тоже видит связь между вольтовой дугой и рассеянием отрицательного электричества с поверхности накаленных проводников [26]. Путем целого ряда рассуждений он приходит к тому заключению, что основным условием существования дуги является высокая температура катода. Что же касается процессов, происходящих в других частях вольтовой дуги, то, по мнению Штарка, они имеют лишь второстепенное значение: «Процессы на аноде и в прочих частях цепи могут иметь только второстепенное значение...» ([26], стр. 700).

9. Перехожу теперь к случаю вольтовой дуги между углями в обычных условиях. Температура оконечности положительного электрода значительно выше, чем отрицательного. По Виолю[31], температура в первом случае равна приблизительно 3500°, во втором — около 2700°. Температуру же самой газообразной дуги он считает выше температуры кратера. На поверхности кратера происходит непрерывное испарение угля. Пары угля, имеющие в момент образования температуру близкую к темпе-

ратуре кратера, распространяются по объему, называемому «дугой». Газы, находящиеся в этом объеме, имеют, однако, температуру значительно высшую, чем температура кратера; это не может быть объяснено иначе, как предположением, что в самом объеме, занимаемом дугой, есть какой-то источник энергии, за счет которого совершается повышение температуры дуги.

Таким источником служит конечно ток, идущий через дугу. Механизм этого можно представить себе следующим образом [3].

Катодный поток, обладающий огромным запасом кинетической энергии, должен пройти через газы «дуги», прежде чем достигнет поверхности кратера, где энергия его движения превращается в тепло. Газы «дуги» оказывают некоторое сопротивление движению отдельных элементов катодного потока, вследствие чего энергия этого движения должна уменьшаться. А за счет этого уменьшения увеличивается тепловая энергия газов «дуги», т. е. повышается их температура.

Ввиду незначительности массы газов, входящих в состав дуги, надо полагать, что лишь малая доля всей энергии катодного потока расходуется на повышение температуры дуги, а во много раз большая часть идет на поддержание того физического процесса на поверхности кратера, которым обусловливается постоянство температуры в этом месте положительного электрода.

10. Оконечность отрицательного электрода дуги имеет температуру около 2700°. Возникает вопрос о причине столь высокой температуры.

Мне кажется, что прежде всего следует обратить внимание на соприкосновение конца катода с раскаленными газами, температура которых значительно выше точки кипения угля: по определениям Розетти, — около 4800° [23]. Далее, накаленная поверхность кратера излучает большое количество энергии, часть которой должна задерживаться концом катода, расположенным вблизи центра кратера. Наконец, при некоторых условиях на конце угля — катода конденсируются пары угля; при этом, конечно, выделяется некоторое количество тепла.

Итак, существует целый ряд вероятных тепловых процессов, направленных в сторону повышения температуры катода.

Но в дуге газ ионизирован; следовательно, там существуют и положительные ионы. Электрические силы сообщают им скорости по направлению к катоду.

Энергия их движения должна, конечно, при ударе о катод превращаться в тепло подобно тому, что происходит у анода. Бомбардировку катода положительными ионами Дж. Дж. Томсон и считает главной причиной нагревания катода; он только эту причину нагревания и принимает во внимание. Мне кажется, однако, что этот источник тепла на катоде должен занимать далеко не первое место в ряду других.

В пользу этого соображения говорят некоторые опытные данные. Прежде всего, результаты моего опыта с явлением Эдисона в атмосфере водорода позволяют думать, что в вольтовой дуге отношение количества электронов к количеству положительных ионов, переносящих ток, например, в единицу времени, должно быть порядка нескольких тысяч. И Дж. Дж. Томсон считает это отношение весьма большим: «...значительно большая часть тока обусловлена потоком отрицательных ионов» ([27], стр. 219).

Элементарный заряд положительного и отрицательного иона один и тот же по абсолютной величине. Полная работа электрических сил, затрачиваемая на перемещение положительного иона от одного электрода дуги к другому должна быть такой же, как и для отрицательного иона (в вольтовой дуге отрицательный ион есть электрон). Следовательно, отношение кинетической энергии, приносимой положительными ионами к поверхности катода, к энергии катодного потока будет никак не больше $\frac{1}{2000}$ (число 2000 беру из своего опыта, см. выше § 4). А если мы в этом отношении будем вместо энергии катодного потока принимать всю энергию, расходуемую в дуге, то, конечно, оно еще немного уменьшится.

Трудно думать, чтобы столь малого количества энергии было достаточно для поддержания высокой температуры катода вольтовой дуги. Для того, чтобы моя мысль была яснее, я приведу примерный подсчет для какого-нибудь действительного случая.

Возьмем, например, нормальную дугу в 10 а. Она будет потреблять около 400 вт. На долю положительных ионов придется не более 0.5 вт (сопоставим эту величину с мощностью в 15—20 вт, поглощаемой обычной пятисвечной лампочкой накаливания).

Но сделаем на время допущение, что действительно кинетическая энергия положительных ионов является главным источником нагревания катода. В таком случае величина поверхности накаленной добела части катода должна быть в подобной

же зависимости от силы тока, как и поверхность кратера. Как известно, изменение площади кратера прямо пропорционально изменению силы тока, питающего дугу. Таким образом, надо было бы ожидать, что отношение площадей кратера и накаленной части катода будет приблизительно постоянно, какой бы ток ни проходил через дугу.

На самом деле, однако, все обстоит иначе ([8], стр. 4). Поверхность накаленной добела части катода возрастает вместе с током, но значительно медленнее сравнительно с поверхностью кратера, так что отношение поверхности кратера к поверхности накаленной части катода быстро возрастает вместе с током. Этот факт указывает на то, что между величиной поверхности накаленной части катода и электрическими процессами, происходящими в вольтовой дуге, нет прямой зависимости.

Естественный вывод из вышеизложенного тот, что величина рассматриваемой поверхности определяется главным образом какими-либо второстепенными процессами, именно, по моему мнению, тепловыми.

11. Я выше рассматривал вольтову дугу между углями. В случае вольтовой дуги между металлическими электродами точно так же основным условием существования дуги надо считать высокую температуру катода. При тугоплавких, или кипящих при высокой температуре, металлах условие это легко может быть выполнено. Дело, повидимому, происходит несколько сложнее в случае, когда электрод кипит при сравнительно низких температурах.

Так, например, в дуговой лампе между двумя ртутными электродами в пустоте температура поверхности жидкого катода, повидимому, не может превышать 350°. А при таких низких температурах едва-ли может быть особенно сильно то явление снятия отрицательного электричества, без которого не может существовать вольтова дуга. Однако, как показали мои наблюдения над формой поверхности ртутного катода, в месте соприкосновения дуги со ртутью на поверхности последней наблюдаются остроконечные бугорки. При этом сама вольтова дуга кажется исходящей из вершины бугорка. Кривизна поверхности ртути на вершине бугорка чрезвычайно велика и, следовательно, нормальное давление в этом месте было бы тоже чрезвычайно велико, если бы температура ртути на вершине бугорка была та же, что и на плоской поверхности.

Трудно, однако, себе представить, чтобы нормальные давления в различных частях поверхности ртутного катода отли-

чались одно от другого сколько-нибудь значительно. Следовательно, поверхностное натяжение ртути на вершине бугорка во много раз меньше такового же при обычных условиях и, следовательно, температура ртути на вершине бугорка должна быть значительно выше температуры ртути на прочих частях поверхности катода, которая, вероятно, равна приблизительно 350°.

Таким образом создаются особые условия, благодаря которым ртуть на вершине бугорка может быть при температуре достаточно высокой для того, чтобы здесь имела место дезинтеграция частиц ртути, сопровождающаяся излучением электронов.

12. Мы перейдем теперь к рассмотрению целого ряда опытных данных, относящихся непосредственно к вольтовой дуге и интересных в том отношении, что они прямо или косвенно подтверждают взгляды, высказанные на предыдущих страницах относительно природы вольтовой дуги.

Прежде всего остановимся на в высшей степени интересных опытах Флеминга [17]. В этих опытах применялся третий угольный электрод — зонд, который либо вводился в дугу, либо, что часто оказывалось более удобным, помещался вне дуги; дуга же направлялась до соприкосновения с ним при помощи магнита. Когда электрод-зонд присоединялся к отрицательному электроду дуги через посредство батареи, состоявшей из нескольких элементов и амперметра, то ток проходил по цепи даже при незначительной электродвижущей силе, если направление тока было от электрода-зонда через дугу к катоду ее и затем в амперметр; в обратном же направлении ток не проходил.

Другими словами можно сказать, что в случае одного электрода накаленного и другого холодного ток может проходить только в том направлении, при котором отрицательное электричество идет в газ с накаленного электрода. И хотя в обычных дугах анод имеет температуру, высшую, чем катод, тем не менее опыт Флеминга показывает, что высокая температура катода есть существенное условие для разряда в виде дуги и что, если бы мы могли поддерживать отрицательный электрод в накаленном состоянии каким-либо посторонним способом, мы могли бы получить ток даже с холодным положительным электродом. Но дуга не может быть получена с холодным катодом.

Далее Флеминг произвел опыт, аналогичный опыту Эдисона с лампочкой накаливания. Именно он соединял электрод-зонд с анодом дуги, не вводя батареи в соединительную цепь. При этом через электрод-зонд проходил ток достаточно сильный для

того, чтобы привести в действие электрический звонок или накаливать лампочку накаливания, помещенную между зондом и анодом дуги. Но когда зонд был соединен с катодом дуги, проходил лишь едва заметный ток. Этот результат показывает, что потенциал электрода-зонда близок к потенциалу катода (см. явление Эдисона).

На основании своих опытов Флеминг заключил, что разряд в виде вольтовой дуги состоит из потока отрицательно заряженных частиц, отрываемых от катода.

13. Работая над вольтовой дугой, Люггин [22] однажды воспользовался в качестве электродов горизонтальным угольным диском в 15 см диаметром и вертикальным угольным стержнем. Диск мог вращаться вокруг вертикальной оси. Дуга получалась у края диска. Когда диск играл роль отрицательного электрода дуги, то оказалось, что даже весьма медленное вращение диска влекло за собой погасание дуги как бы ни был силен ток. Но когда диск служил положительным электродом, то можно было сообщить диску весьма быстрое вращение и все-таки дуга не гасилась.

Таким образом, из опытов Люггина следует, что для существования вольтовой дуги необходимо, чтобы место соприкосновения дуги с отрицательным углем было вполне определенное, т. е. чтобы явление, установившееся у отрицательного электрода, ничем не нарушалось. В то же время дуга может сколько угодно быстро (при достаточно сильном токе) скользить вдоль поверхности положительного электрода: дуга от этого не прекращается; кратер же при малых скоростях вращения диска просто перескакивает с места на место, а при больших скоростях выжигает сплошной канал.

Итак, для поддержания вольтовой дуги существенно необходимо соблюдение некоторых условий у отрицательного электрода дуги. Нарушение же этих условий у положительного электрода не исключает самого факта существования дуги. Естественный вывод, который можно сделать из опыта Люггина, — следующий: у катода вольтовой дуги происходит какое-то явление, имеющее более существенное значение сравнительно с тем, что происходит у анода.

14. Упомянем теперь об опытах Дьюара [11], в которых, по моему мнению, прямо обнаруживается давление катодного потока на анод дуги. Дьюар в этих опытах получил горизонтальную вольтову дугу между углями, которые были снабжены продольными каналами, соединенными с весьма чувствитель-

ными манометрами. Когда дуга горела совершенно спокойно, манометр, присоединенный к положительному углю, показывал некоторое постоянное увеличение давления, которое доходило до 2 мм вертикального столба воды в зависимости от условий опыта. В то же время у отрицательного электрода не наблюдалось никакого вполне определенного эффекта. Подобный же результат был получен Дьюаром и в том случае, когда вольтова дуга и концы углей были заключены внутрь куска магнезии, а также и тогда, когда манометры были наполнены вместо воздуха окисью углерода или азотом.

Я полагаю, что в опытах Дьюара неопределенность результатов относительно отрицательного угля получалась вследствие того, что почти невозможно достигнуть, чтобы дуга покрывала конец этого угля симметрично относительно отверстия канала: обыкновенно она располагается сбоку канала. В случае положительного угля без всякого затруднения удается получить кратер так, что отверстие канала оказывается в центре его. Во всяком случае наблюдения Дьюара являются весьма серьезным доводом в пользу высказанного предположения о механизме вольтовой дуги.

15. Я наблюдал давление дуги на поверхность анода в условиях, несколько отличающихся от тех, в которых работал Дьюар. При этом я работал с вольтовой дугой между жидким металлом и углем. Явление, о котором идет речь, легче всего наблюдать, если в качестве жидкого металла взята ртуть. Оно, например, наблюдается в ртутных дуговых лампах Аронса, где оба электрода из ртути. Но явление это выступает гораздо рельефнее, когда поверхность ртутного электрода имеет большие размеры и потому менее деформируется под влиянием капиллярных сил.

Я пользовался дугой между вертикальным углем и горизонтальной ртутной поверхностью; поэтому я и перейду теперь к описанию опыта в таком именно виде.

Вольтова дуга между ртутью и углем получалась в закрытой колбе диаметром около 10 см (рис. 4). Горло колбы было закрыто резиновой пробкой, сквозь которую проходили два железных стержня a и b, подводивших ток к электродам дуги. Именно, железный стержень a, изогнутый в нижней своей части, был погружен в ртуть Hq; стержень b оканчивается внизу угледержателем D, в который вставлялся уголь C. Для того, чтобы можно было приводить уголь в соприкосновение с поверхностью ртути и затем разводить электроды, стержень b пропущен был сквозь стеклянную трубочку, вставленную в рези-

новую пробку. Стеклянная трубочка снабжена была вверху насадкой из толстостенной резиновой трубки, плотно охватывавшей железный стержень, но позволявшей свободно передвигать его вверх и вниз. Такое устройство необходимо было принять для того, чтобы не допустить просачивания воздуха сквозь пробку внутрь колбы, где обыкновенно производилось разрежение до 3—5 мм рт. ст. Откачивание воздуха производилось через вставленную в пробку стеклянную трубочку *l* и резиновую трубку *k*, запиравшуюся обычным зажимом. Из предосторожности колба помещалась в ванну с водой.

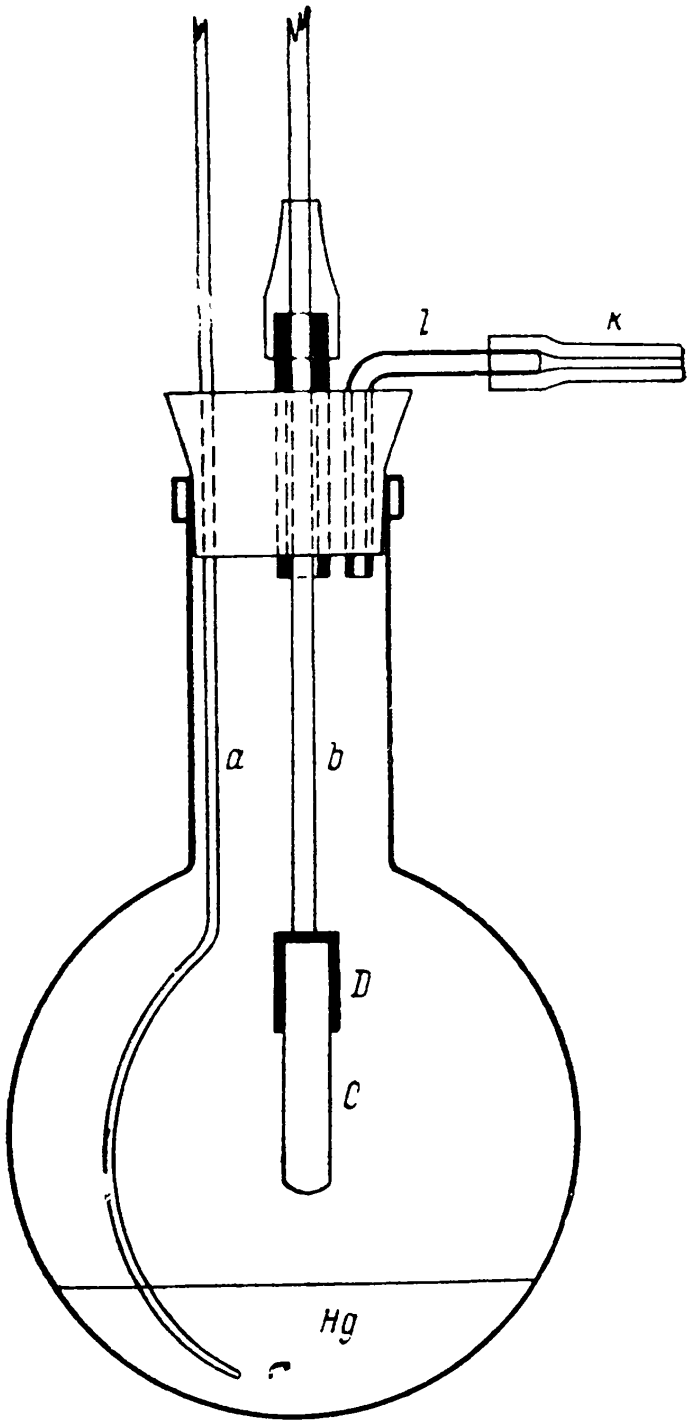


Рис. 4.

Если теперь между ртутью и углем образовать дугу и если при этом ртуть служит положительным электродом, то на поверхности ее у основания вольтовой дуги наблюдается в п а д и н а, т. е. все происходит так, как будто бы дуга производит давление на поверхность анода. Диаметр этой впадины колеблется в моих опытах приблизительно от 3 до 7 мм соответственно изменениям силы тока от 9 до 30 а.

Весьма, конечно, вероятно, что явление это до некоторой степени обусловлено значительным выделением тепла на аноде, влекущем за собой сильное испарение ртути. Но несомненно и то, что образование впадины в значительной степени должно зависеть еще от какого-то иного происходящего в дуге процесса.

Действительно, если бы все дело было лишь в обильном испарении ртути, то взяв ее в качестве отрицательного электрода, мы должны были бы ожидать чего-либо, подобного тому, что происходит на ртутном аноде, хотя, быть может, и в более слабой степени. Однако в случае ртути в качестве катода наблюдается следующее: на поверхности ртути у основания дуги возникают остроконечные бугорки, высота которых,

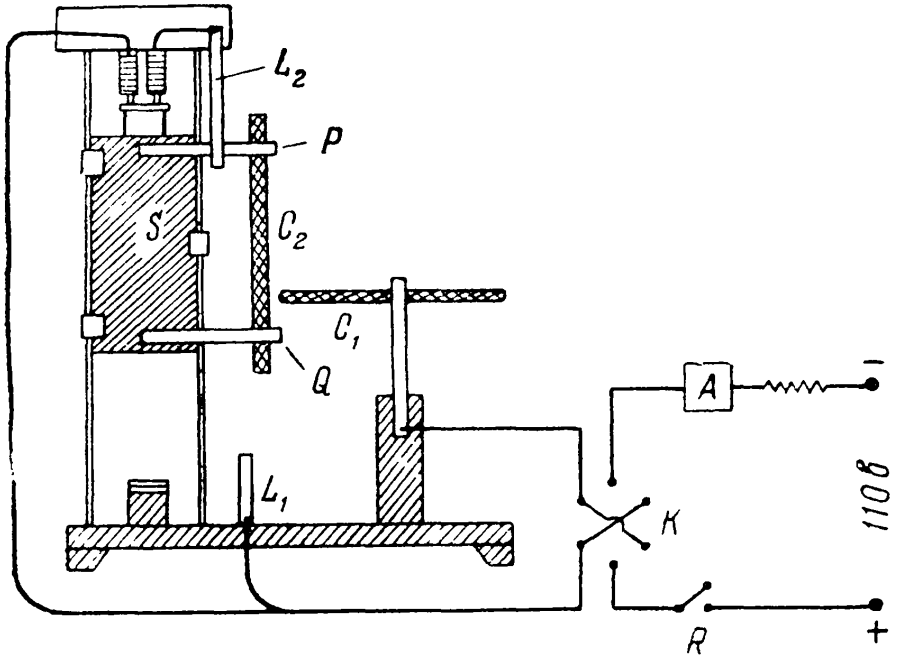


Рис. 5.

оцениваемая на глаз, равна от 0.5 до 1 мм. Приходится допустить существование в вольтовой дуге какого-то особого процесса, результатом, которого являются чисто механические силы.

16. Если разомкнуть цепь вольтовой дуги и затем быстро вновь ее замкнуть прежде, чем концы углей успели значительно охладиться, то дуга вновь возникает без нового соприкосновения электродов. Это факт общеизвестный.

Я произвел опыт, из которого следует, что в данном случае существенно лишь, чтобы катод не успел охладиться. Температура же анода не имеет особенного значения. Таким образом, подтверждается наш взгляд на вольтову дугу.

Для производства опыта я пользовался прибором изображенным на рис. 5. Прибор этот имел две вертикальные направляющие, которые были сделаны из стеклянных трубок. Между ними могла скользить вверх и вниз тележка S, к которой были прикреплены два угледержателя P и Q. При помощи их уголь C_2 удерживался в вертикальном положении параллельно направляющим, так что при перемещениях тележки расстояние

между концом горизонтального угля C_1 и поверхностью угля C_2 оставалось неизменным.

В крайнем верхнем и в крайнем нижнем положениях тележки уголь C_2 присоединялся автоматически к цепи через посредство контактных пластин L_1 и L_2, надвигавшихся с легким трением на угледержатели P и Q. Вся подвижная система могла удерживаться в верхнем положении, как показано на рис. 5, при помощи электромагнита, включаемого в главную цепь последовательно с дугой. На рис. 5 показано схематически, как этот прибор был включен в цепь. При помощи коммутатора K я мог менять направление тока в дуге.

Опыт производился следующим образом.

Тележка поднималась кверху и зажигалась вольтова дуга между горизонтальным углем C_1 и нижней частью угля C_2. Затем ток прерывался на момент или при помощи рубильника R, или простым отрыванием тележки от электромагнита, или же наконец при помощи коммутатора K, который к тому же еще менял направление тока в дуге. Во всех случаях тележка S падала с углем C_2 вниз.

При этом во все время падения уголь C_2 совершенно выключался из цепи и оставался изолированным, чем обеспечивалось несомненное погасение дуги на время передвижения угля C_2 из верхнего положения в нижнее, когда он опять включался в цепь при помощи пластины L_1. В этом случае оказывались расположенными один против другого два электрода: один накаленный, другой холодный. И если только накаленный уголь (горизонтальный C_1) после перерыва оказывается катодом, то дуга, вообще говоря, вновь зажигается.

В противном случае, когда катодом служит холодный вертикальный уголь, дуга обыкновенно вновь не зажигается. Иногда случалось наблюдать вспыхивание дуги и в последнем случае, но тут было ясно, что в силу особых условий поверхность угля C_2, расположенная против угля C_1, успевала очень быстро накалиться до температуры, необходимой для возникновения дуги. Особые условия при этом заключались в том, что я иногда пользовался в качестве угля C_1 углем с фитилем обыкновенным и даже иногда так называемым пламенным. В этом случае после погасания дуги видно, как из фитиля продолжает бить сильная струя раскаленных газов. Продолжается это несколько секунд. И если эта струя попадает на очень близко расположенный холодный уголь, то последний быстро накаливается в месте падения струи.

Одним словом, из опытов с описанным прибором получается такой вывод: дуга возникает без соприкосновения электродов между раскаленным катодом и каким угодно анодом — холодным или горячим; дуга не возникает, если катодом служит холодный электрод.

Длина дуги в моих опытах была от 1 до 8 мм. Сила тока — около 20—30 а. Для успеха опыта оказывалось полезным предохранять раскаленный конец угля C_1 от охлаждения за время перерыва тока. С этой целью я обертывал конец этого угля асбестовым картоном. Выгодным оказывалось также брать уголь C_1 с фитилем или высверливать в конце его канал по оси (в 0.5—1 см длиной). В последнем случае внутренние стенки канала оказывались в условиях, более благоприятных для удержания высокой температуры.

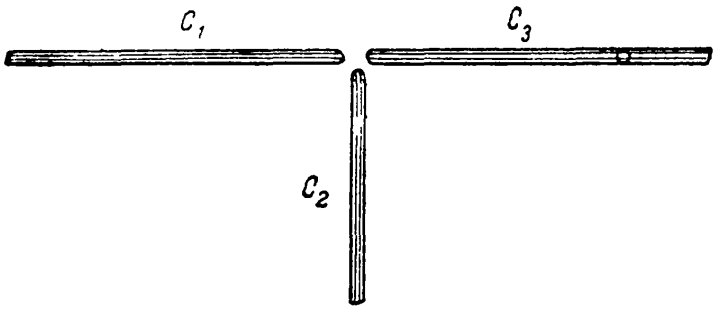


Рис. 6.

Легче всего удается опыт, если уголь C_1 служит сначала анодом. На нем образуется кратер и он разогревается чрезвычайно сильно. Когда затем, после изменения направления тока, он оказывается соединенным с отрицательным полюсом генератора, то удается получить возникновение дуги через 1—2 сек. после гашения ее. Но во всяком случае основное явление может быть получено при каких угодно углях и при каком угодно порядке производства опыта, лишь бы только температура катода была достаточно высока.

17. Я произвел еще следующий опыт для иллюстрации того, что высокая температура катода есть основное условие существования вольтовой дуги, температура же анода не существенна. Опыт располагался следующим образом.

При посредстве особых угледержателей три угля C_1, C_2, C_3 размещались так, что горизонтальные угли C_1 и C_3 составляли приблизительно продолжение один другого, а конец вертикального угля C_2 оказывался как раз под концами C_1 и C_3 (рис. 6), расстояние между которыми было около 5—8 мм. Угли C_1 и C_3 были металлически соединены между собой, т. е. они оба всегда были одного и того же знака. Уголь C_3 мог вращаться в вертикальной плоскости.

Таким образом легко можно было, опуская конец угля C_3 до соприкосновения с C_2, зажигать вольтову дугу между C_2 и C_3. Поднимая же конец угля C_3 кверху, можно было столь сильно удлинять дугу, что она наконец обрывалась. Однако, если C_2 был катодом, дуга не погасла окончательно, но перескакивала при этом на холодный уголь C_1 и продолжала гореть между C_1 и C_2. Если же уголь C_2 служил анодом в дуге между C_2 и C_3, то после удаления угля C_3 дуга могла перескочить на C_1 только в тех случаях, когда конец C_1 предварительно накаливается, будучи вдвинут в дугу.

18. Только что описанный опыт по существу представляет собой видоизменение опыта Люггина (см. § 13). Опыт на ту же тему можно произвести и с прибором, изображенным на рис. 5. Необходимо только соединить гибким проводником уголь C_2 с пластинкой L_1 или L_2. Таким образом получается возможность зажечь дугу между C_1 и C_2 и затем, не прерывая тока, перемещать уголь C_2 параллельно самому себе. При этом чрезвычайно интересно наблюдать следующее.

Когда горизонтальный уголь C_1 служит катодом, то перемещение угля C_2 не гасит дуги; дуга, оставаясь неизменной в пространстве, скользит по поверхности двигающегося угля C_2, т. е. вдоль угля C_2 скользит кратер дуги. Если же горизонтальный уголь C_1 служит анодом дуги, то при передвижении угля C_2 дуга кажется прикрепленной к некоторой определенной точке этого угля C_2 (накаленное место), она вытягивается и изгибается; в конце концов дуга гаснет от чрезмерного удлинения. Одним словом, анодом дуги может служить и холодное место угля, катодом же может быть только место, предварительно накаленное до достаточно высокой температуры.

Еще в более простой форме можно наблюдать то же явление при перерезании достаточно длинной дуги поперечным углем или металлическим стержнем. Дуга не гаснет только в том случае, если перерезывающий ее уголь или металлический стержень все время касается конца положительного электрода дуги, т. е. трется или катится по поверхности анода. В противном случае дуга вытягивается в виде петли, как эластичная нить, огибающая перерезывающий стержень, и, наконец, гаснет, потому что на сравнительно холодной поверхности этого стержня не может образоваться временный катод.

19. В случае, рассмотренном в § 16, вольтова дуга возникает между накаленным катодом и холодным анодом без предварительного их соприкосновения. Но здесь катод предварительно разогревается вольтовой же дугой, т. е. он предвари-

тельно уже участвует в электрическом процессе, так что можно было бы подумать, что при этом он приобретает какие-либо особенные свойства и что суть дела заключается не в одной только температуре его.

Я пытался зажечь вольтову дугу, не приводя электроды в соприкосновение, накаливая лишь предварительно катод при посредстве пламени, богатого кислородом. Сначала я пробовал нагревать конец катода водородно-кислородным пламенем. Хотя температура самого пламени в этом случае и была высо-

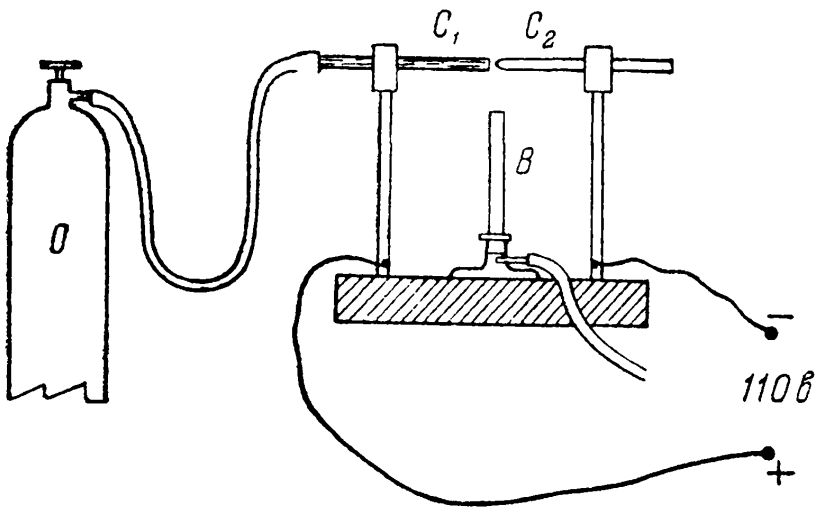


Рис. 7

ка, но, очевидно, пламя было недостаточно мощно, чтобы довести температуру катода до требуемой границы.

Кроме того, я увидел, что в условиях моего опыта нагревать один только катод было чрезвычайно трудно, ибо анод тоже сильно накаливался. Однако ясно, что нагревание анода не имеет существенного значения и не мешает возникновению дуги. Оно только маскирует в этом опыте особенное значение катода вольтовой дуги.

Я все-таки продолжал опыты с накаливанием обоих концов углей, направляя на предварительно нагретые угли струю кислорода. Угли начали гореть в кислороде и при этом температура их подымалась настолько, что дуга, наконец, проскакивала между ними. Выгоднее всего оказалось подводить кислород в промежуток между углями, пользуясь для этой цели каналом, высверленным в одном из углей.

Расположение опыта показано на рис. 7: C_1 — уголь с каналом (я брал угли от 8 до 15 мм диаметром с каналом от 1.5 до 2 мм диаметром); C_2 — сплошной уголь (от 6 до 15 мм диаметром); B — бунзеновская горелка; O — баллон с сжатым кислородом. Сначала концы углей разогревались пламенем

бунзеновской горелки до красного каления. Затем мало-помалу приоткрывался запорный кран от кислорода. При этом концы углей накаливались добела и дуга проскакивала между углями. Когда начинался приток кислорода, бунзеновскую горелку можно было тушить. Мне удавалось таким способом зажигать дугу при расстоянии между углями, доходившем до 15 мм.

Итак, совершенно несущественно, каким именно образом производится нагревание катода вольтовой дуги. Важно лишь, чтобы он был нагрет до температуры достаточно высокой.

20. Все опыты с вольтовой дугой, описанные на предыдущих страницах, ничего еще не говорят сами по себе о том, какова природа катодного потока, составляющего основной процесс вольтовой дуги. Опыты над рассеянием отрицательного электричества с поверхности накаленных проводников заставляют нас думать, что катодный поток в вольтовой дуге состоит из электронов. Однако представляет некоторый интерес непосредственное определение характера «носителей тока» в вольтовой дуге.

В дальнейшем рассуждении мы сделаем следующие допущения.

В о - п е р в ы х, мы предположим, что весь ток в вольтовой дуге несется отрицательными ионами; другими словами, мы не будем принимать во внимание положительных ионов. Это мы можем сделать на основании соображений, изложенных в § 10. В о - в т о р ы х, мы примем, что вся мощность, расходуемая в дуге, идет на сообщение отрицательным ионам кинетической энергии и что вся эта энергия целиком приносится к поверхности кратера. Это мы можем допустить без большой погрешности по многим соображениям.

Действительно, в вольтовой дуге энергия идет на нагревание катода, анода и самой дуги, на дезинтеграцию вещества катода и на ионизацию газов дуги. Но мы имеем основания (см. § 10) не принимать во внимание положительных ионов в силу их сравнительно ничтожного количества. По этой же причине мы пренебрегаем энергией, идущей на ионизацию газов вольтовой дуги. Энергией, идущей на нагревание газов дуги выше температуры кипения вещества анода, мы пренебрежем ввиду малости массы нагреваемых газов в случаях коротких дуг, к которым только и относятся дальнейшие рассуждения.

О нагревании катода мы говорить не будем, ибо оно является результатом вторичных процессов, именно притока тепла со стороны более нагретых частей дуги (см. § 10). Дезинтеграция вещества катода очевидно совершается за счет тепла, прите-

кающего к катоду, и потому мы об этом расходе энергии также можем не говорить. Остается, таким образом, нагревание анода вольтовой дуги, на которое в случае короткой дуги несомненно идет значительнейшая часть всей мощности, расходуемой в дуге.

Допустим теперь, что i есть сила тока, питающего дугу, e — заряд (отрицательный) каждого иона, отделяющегося от катода, и N — число отрицательных ионов, проходящих в 1 сек. через любое поперечное сечение дуги. В таком случае

$$i = Ne. \tag{1}$$

Далее, пусть m есть масса каждого отрицательного иона, v — его скорость у поверхности анода, W — электрическая мощность, поглощаемая дугой; тогда

$$W = \frac{1}{2} Nmv^2. \tag{2}$$

Наконец, обозначив через f силу давления дуги на поверхность анода, можем написать соотношение, выражающее, что эта сила равна количеству движения, теряемому движущимися ионами в 1 сек., т. е.

$$f = Nmv. \tag{3}$$

Из этих трех соотношений получается:

$$v = \frac{2W}{f}, \tag{4}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2Wi}{f^2}. \tag{5}$$

Из опыта можно определить величины, входящие в правые части выражений (4) и (5), и, таким образом, получается возможность судить о размерах v и $\frac{e}{m}$.

21. Прежде всего я произвел измерение для случая вольтовой дуги между ртутью и углем, описанного в § 15.

Значительные трудности представляет точное определение f — силы давления дуги на поверхность ртутного анода. Эта величина входит в знаменатель выражения $\frac{e}{m}$ во второй степени и потому ошибка в определении ее сильно отражается на конечном результате. Можно представить себе целый ряд способов для определения силы f. Однако все они кажутся мне

недостаточно надежными в данном случае при определении силы в несколько десятков миллиграммов.

Ввиду этого я остановился на простейшем из возможных способов, так как он, несмотря на кажущуюся грубость, несомненно дает приближенную величину силы f. Именно, я определял величину того давления, какое нужно произвести на некоторую часть поверхности ртути, чтобы получилась впадина по форме и размерам подобная той, которая образуется на ртути — аноде под влиянием вольтовой дуги. Само давление на поверхность ртути производилось при посредстве струи воздуха, выходившего из конца капиллярной трубки. Величина этого давления определялась путем взвешивания на весах.

Измерение силы f я произвел для трех различных режимов вольтовой дуги. Для того чтобы облегчить себе подыскивание соответственной струи воздуха, я после целого ряда наблюдений над дугой изготовил на поверхности оловянной пластинки три модели впадин для трех режимов вольтовой дуги.

В табл. 2 приведены результаты наблюдений и вычисленные на основании этих данных величины v и $\frac{e}{m}$.

Таблица 2

№	Длина дуги в миллиметрах	Сила тока в амперах	Напряжение между электродами в вольтах	Давление f в динах	v в сантиметрах в секунду	$\frac{e}{m}$ в электромагнитных единицах
1	10	9	32	30	$1.9 \cdot 10^8$	$0.6 \cdot 10^7$
2	20	20	45	80	$2.3 \cdot 10^8$	$0.6 \cdot 10^7$
3	25	30	50	150	$2 \cdot 10^8$	$0.4 \cdot 10^7$

При определении силы f я пренебрег двумя обстоятельствами. Во-первых, я не принимал во внимание возможности увеличения кажущихся размеров впадины на поверхности ртути — анода вследствие сильного испарения ртути. Во-вторых, поверхностное натяжение ртути в пределах впадины, по всей вероятности, весьма незначительно ввиду высокой температуры поверхностного слоя.

Таким образом, весьма возможно, что истинные величины f несколько меньше принятых мной приближенно, и, следовательно, величины v и $\frac{e}{m}$ несколько больше приведенных в таблице. Ясно, конечно, что полученные мной цифры для v и $\frac{e}{m}$ должны быть рассматриваемы лишь как данные для сужде-

ния о порядке этих величин, а отнюдь не об их истинных размерах.

22. Ввиду интереса, представляемого определением порядка величины $\frac{e}{m}$ для случая вольтовой дуги, я сделал еще один ряд измерений. При этом я работал с дугой между двумя угольными электродами и воспользовался способом Дьюара для определения величины давления катодного потока на поверхность анода (см. § 14).

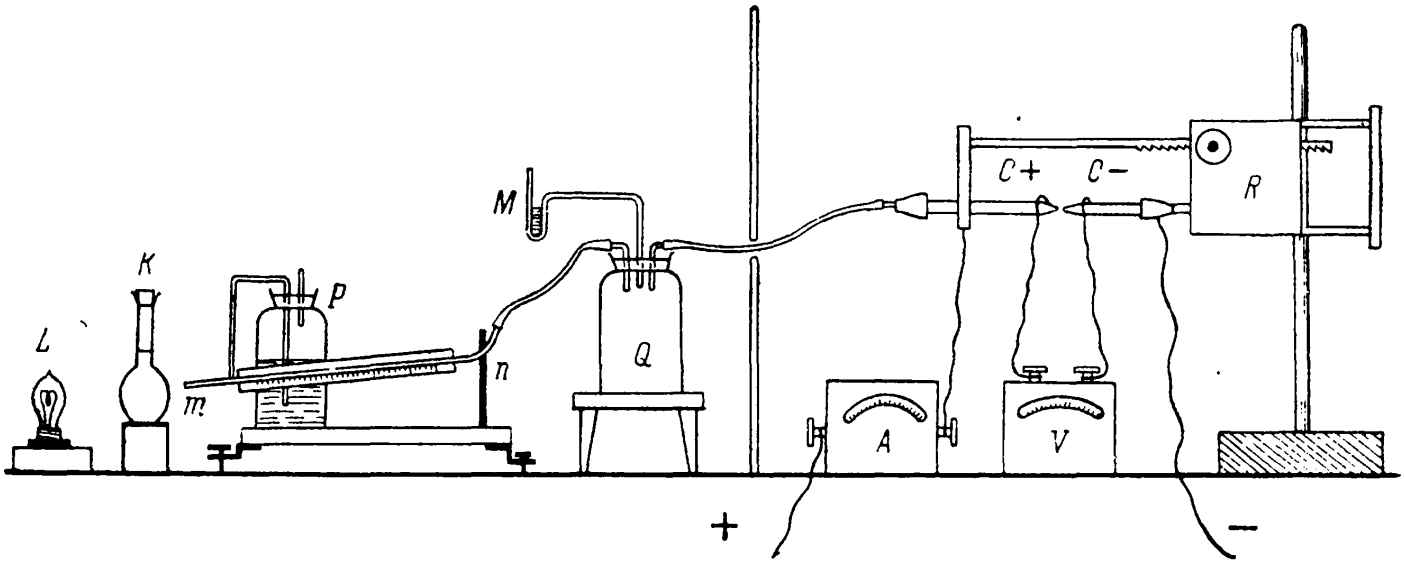


Рис. 8.

На рис. 8 представлено расположение приборов в моих опытах. Дуга получалась между горизонтально расположенными углями $C-$ и $C+$, вставленными в угледержатели ручного регулятора R. Уголь $C-$ (диаметром в 9 мм) был без фитиля и без канала. Уголь $C+$ (диаметром в 16 мм) был снабжен продольным каналом в 3 мм диаметром, образовавшимся после удаления фитиля. Через посредство резиновых трубок и сосуда Q канал угля $C+$ был присоединен к очень чувствительному манометру с наклонной трубкой mn. Трубка эта была подобрана из партии толстостенных трубок с возможно меньшей кривизной. Внутренний диаметр ее был равен приблизительно 2 мм. Недалеко от конца m к трубке mn был припаян один конец сифона, опущенного другим концов в склянку P с серным эфиром.

При помощи особой трубочки, вставленной в пробку, склянка P сообщалась с окружающей атмосферой. Серный эфир заполнял весь сифон и часть трубки mn, наклон которой в моих опытах был такой, что изменение давления на 1 мм вертикального столба воды соответствовало перемещению мениска сер-

ного эфира приблизительно на 20 мм. Для того чтобы легче было следить за положением мениска, этот последний освещался при помощи окрашенной цветным лаком лампочки накаливания L. Свет ее охлаждался и собирался колбочкой K, наполненной водой, и затем направлялся на закругленный конец m манометренной трубки. Благодаря такому приспособлению вершина мениска серного эфира казалась ярко светящейся, между тем как прочие части трубки mn оставались темными.

Для градуирования манометра Pmn я пользовался манометром M, который был присоединен к сосуду Q. В манометре M был налит винный спирт, а не вода, так как при употреблении спирта мениски получались более чистые, и потому можно было достигнуть большей точности определения небольших давлений. Манометр был защищен экраном от действия тепла, излучаемого дугой.

Сила тока, питавшего дугу, измерялась амперметром A; к концам углей был присоединен вольтметр V.

Горизонтальное расположение углей принято по примеру Дьюара потому, что при этом условии потоки воздуха меньше всего влияют на показания манометра. Некоторое влияние, конечно, остается в этом случае: вертикальные потоки воздуха несколько уменьшают давление в канале угля $C+$. В этом можно убедиться, как это делал еще Дьюар, разомкнув ток после того как концы углей накалились благодаря вольтовой дуге.

Однако это отрицательное давление ничтожно мало по сравнению с положительным давлением, которое наблюдается, когда дуга с п о к о й н о горит. Пока дуга находится в неустойчивом состоянии, т. е. шипит и т. д., манометренные наблюдения невозможны. В этом случае положение кратера непостоянно. Он часто располагается сбоку от отверстия канала. Даже при симметричном на вид расположении кратера относительно отверстия канала, в случае шипящей дуги явление осложняется быстрым вращением дуги, которое было обнаружено впервые Троттером [30] при помощи стробоскопического метода. Благодаря всем этим причинам при шипении дуги показания манометра неустойчивы и неопределенны. Я на них и не останавливаюсь.

Дьюар произвел много опытов с целью убедиться, не вызывает ли некоторого постоянного давления местное нагревание стенок угольного канала. Между прочим, он образовал вольтову дугу, перпендикулярную к боковой поверхности сверленого

угля на некотором расстоянии от конца, и для того, чтобы нагреть внутренние стенки канала до возможно высшей температуры, он заключил это место и самую дугу в кусок магнезии. При этом, однако, манометр, соединенный с каналом, оставался совершенно спокойным.

Таким образом, можно принять, что при совершенно спокойном горении вольтовой дуги и при горизонтальном расположении углей давление, обнаруживаемое манометром, зависит только от особого процесса, происходящего в вольтовой дуге.

23. Целью моих наблюдений было определение полного давления вольтовой дуги на анод. Из показаний манометра я получал давление в динах на квадратный миллиметр. Умножая его на поверхность кратера, мы узнаем полное давление на анод.

При определении давления на 1 мм² приходится считаться с изменением показаний манометра в зависимости от длины дуги. Именно, в моих опытах оно возрастало с уменьшением длины дуги и достигало некоторого предела при длине дуги от 0.5 до 1 мм (под длиной дуги я здесь подразумеваю истинное расстояние между поверхностью кратера и концом отрицательного угля).

Я объясняю это обстоятельство со своей точки зрения следующим образом.

Давление, обнаруживаемое манометром, есть результат вхождения внутрь канала отрицательных ионов. Это давление должно быть равно среднему давлению на поверхность кратера в том случае, если число ионов, падающих в 1 сек. на 1 мм² отверстия канала, равно числу ионов, падающих в 1 сек. на 1 мм² поверхности кратера. Это условие было бы соблюдено, если бы ионы, отделяющиеся от катода, двигались дальше по инерции прямолинейно. Но в вольтовой дуге эти ионы уклоняются от своего прямолинейного пути под влиянием электрических сил, действующих вдоль дуги. Об этом свидетельствует сама форма вольтовой дуги.

Следовательно, чем короче вольтова дуга, чем меньше падение напряжения вдоль самой дуги, т. е. чем меньше уклоняющее действие электрических сил вдоль дуги, тем более мы приближаемся к таким условиям, когда давление, показываемое манометром, можно считать равным среднему давлению дуги на поверхность анода.

На основании вышеизложенных соображений я производил наблюдения именно над дугами длиной от 0.5 до 1 мм. Полу-

чение спокойно горящей дуги при таких условиях, хотя и представляет некоторые затруднения, но, во всяком случае, вполне возможно. При короткой дуге пары угля, выделяющиеся с поверхности кратера, не успевают сгорать вследствие недостаточного притока воздуха и потому конденсируются на катоде, где при этом быстро растет «грибок». Образование «грибка» ограничивает продолжительность каждого опыта, так как оно вызывает в конце концов соприкосновение катода с анодом.

Поверхность кратера я определил экстраполированием на основании данных, полученных Айртон ([8], стр. 159). Она нашла, что при данной длине дуги (в ее опытах от 1 до 4 мм) зависимость поверхности кратера от силы тока выражается прямой линией. Опыты Айртон были произведены при силах тока от 4 до 20 а. Я допустил ту же прямолинейную зависимость и при несколько бо́льших силах (от 23 до 27 а).

В табл. 3 приведены полученные мной данные, а также результаты, вычисленные на основании выражений (4) и (5).

Таблица 3

№	Сила тока в амперах	Напряжение между углями в вольтах	Давление в мм шкалы манометра	Давление в динах на 1 кв миллиметр	Вычисленная поверхность кратеров в кв. миллиметрах	Полное давление в динах	v в сантиметрах в секунду	$\frac{e}{m}$ в электромагнитных единицах
1	24	25	23	1.2	37.5	45	$2.7 \cdot 10^8$	$1.45 \cdot 10^7$
2	26	20	23	1.2	40	48	$2.15 \cdot 10^8$	$1.18 \cdot 10^7$
3	26	22	30	1.56	40	62	$1.86 \cdot 10^3$	$0.80 \cdot 10^7$
4	25	25	23	1.2	39	47	$2.65 \cdot 10^8$	$1.40 \cdot 10^7$
5	24	23	28	1.46	37.5	55	$2.00 \cdot 10^8$	$0.88 \cdot 10^7$
6	24.5	22	28	1.46	37.5	55	$2.00 \cdot 10^8$	$0.88 \cdot 10^7$
7	23	27	23	1.2	35.5	43	$2.90 \cdot 10^3$	$1.54 \cdot 10^7$
8	24	27	32	1.66	37.5	62	$2.10 \cdot 10^3$	$0.80 \cdot 10^7$
9	27	28	23	1.2	41.5	50	$3.00 \cdot 10^8$	$1.56 \cdot 10^7$

24. Относительно полученных мною цифр следует заметить, что во всяком случае на основании их можно говорить о порядке v и $\frac{e}{m}$. Поэтому можно считать, что для $\frac{e}{m}$ у меня получилась такая же величина, как и у других наблюдателей, изучавших не вольтову дугу, а катодный пучок круксовой трубки с точки зрения баллистической гипоте́зы. Так, Дж. Дж. Томсон [28] нашел, что в случае катодных лучей $\frac{e}{m}$ равно от $0.7 \cdot 10^7$ до

$0.9 \cdot 10^7$. Для тех же катодных лучей опыты Кауфмана [20] дают $\frac{e}{m}$ от 10^7 до $2.86 \cdot 10^7$, опыты Симона [25] — $1.865 \cdot 10^7$, а опыты Вихерта [32] — $1.25 \cdot 10^7$. Я же в случае ртутной вольтовой дуги получил $\frac{e}{m}$ равное $0.4 \cdot 10^7$ и $0.6 \cdot 10^7$, а для дуги между угольными электродами — от $0.8 \cdot 10^7$ до $1.56 \cdot 10^7$.

Смысл подобного совпадения, повидимому, тот, что механизм прохождения электричества через круксову трубку и через вольтову дугу один и тот же. Это заключение должно быть справедливо независимо от того, какова истинная природа этих явлений.

Что касается скорости (v), то для нее я получил величину раз в 10 меньшую найденной другими наблюдателями для случая катодных лучей. Это различие мне кажется вполне естественным, так как в круксовой трубке мы имеем дело с электрическими силами значительно большими, чем в вольтовой дуге.

25. Итак, целый ряд опытных данных подтверждает тот взгляд на природу вольтовой дуги, согласно которому основным условием существования дуги является высокая температура катода, а основной процесс в дуге есть поток электронов, исходящих из накаленного катода.

Теперь становится в достаточной степени понятным механизм зажигания вольтовой дуги во всех случаях, известных в настоящее время.

Самый обычный способ зажигания вольтовой дуги состоит в том, что электроды сначала сближают до соприкосновения и затем разводят. Возникновение вольтовой дуги, очевидно, происходит следующим образом.

С момента соприкосновения электродов по цепи начинает проходить ток. Джоулево тепло, развивающееся в месте контакта, будет непрерывно разогревать концы электродов вплоть до полного разрыва контакта. Таким образом, до образования дуги концы электродов в местах соприкосновения будут сильно нагреты и, если температура катода будет достаточно высока, то в момент прекращения контакта возникает дуга. Далее все происходит так, как изложено было выше (в §§ 7—11).

Существует еще следующий способ зажигания дуги без предварительного соприкосновения электродов.

Между концами разведенных электродов, присоединенных к генератору, пропускают ряд искр от батареи лейденских банок.

Если искра достаточно мощна, то через некоторое время зажигается сама собой дуга. Объясняется это опять-таки тем, что искра нагревает до высокой температуры некоторый элемент поверхности электрода, соединенного с отрицательным полюсом генератора. В случае колебательного разряда, состоящего из ряда искр попеременного направления, обыкновенно нагреваются оба электрода искры. Если же в ряде искр доминирует какое-либо одно направление тока, как это, например, бывает в случае катушки Румкорфа без лейденских банок во вторичной цепи, то нагревается главным образом катод искры.

В этом состоит одно из внешних отличий вольтовой дуги от искры. И если мы желаем зажечь дугу между разведенными электродами при помощи искр от катушки Румкорфа, то необходимо произвести соединение таким образом, чтобы электрод, являющийся катодом в искре, был катодом же и в вольтовой дуге. Из вышесказанного ясно, почему и при каких условиях возможен переход искрового разряда в дугу.

Подобный переход может быть наблюдаем очень хорошо, если для образования искр и вольтовой дуги пользоваться одним и тем же генератором. Последний должен развивать, конечно, достаточно высокую электродвижущую силу и обладать достаточной мощностью, как, например, батарея из очень большого числа аккумуляторов.

В статье Штарка, о которой я выше упоминал, обстоятельно рассмотрен этот случай перехода искры в дугу.

26. Как известно, для того, чтобы дуга могла возникнуть и далее поддерживаться совершенно с а м о с т о я т е л ь н о, необходимо располагать генератором, могущим развивать электродвижущую силу и силу тока не меньше некоторой определенной для данных электродов величины. Надо думать, что это условие, м е ж д у п р о ч и м, зависит от необходимости накалить в достаточной степени катод дуги и далее поддерживать его в таком состоянии. На это нельзя затрачивать сколь угодно малое количество энергии в единицу времени. Очевидно, существует минимальный предел, дальше которого нельзя идти.

На предел этот должна оказывать влияние природа вещества электродов, ибо вообще рассеяние отрицательного электричества с накаленного проводника при одной и той же температуре зависит от материала этого проводника; кроме того, при одной и той же мощности, затрачиваемой на нагревание электрода, его температура при прочих равных условиях будет зависеть от теплопроводности его, т. е. опять от материала, из которого он изготовлен.

27. В случае вольтовой дуги между угольными электродами в воздухе оказывается полезным брать положительный уголь с фитилем, заполняющим канал вдоль оси угля. Этот фитиль обыкновенно состоит из смеси угля и разных металлических солей, имеющих температуру кипения ниже, чем в случае угля. Благодаря этому образуется значительно больше раскаленных паров, чем при употреблении углей без фитиля, и этим объясняется возникновение пламеобразной оболочки вокруг дуги (в собственном смысле этого слова).

Очевидно, оболочка из раскаленных газов, окружающая дугу и концы электродов, должна до некоторой степени предохранять конец катода от потери тепла и вообще должна способствовать более сильному нагреванию его; следовательно, в случае углей с фитилями температура катода будет достаточно высока при меньшей мощности, расходуемой в вольтовой дуге, сравнительно со случаем углей без фитиля. Опыт вполне подтверждает это.

В случае углей с фитилями разность потенциалов всегда меньше при данной силе тока и данной длине дуги сравнительно с тем, что наблюдается с углями без фитиля, т. е. все происходит так, как будто бы «сопротивление» дуги стало меньше. Этим кажущимся изменением сопротивления и объясняет Айртон наблюдаемое различие между вольтовыми дугами в рассмотренных двух случаях ([8], стр. 422).

Надо думать, что все вообще обстоятельства, затрудняющие охлаждение катода вольтовой дуги, должны способствовать большей устойчивости ее. Для примера можно взять так называемую «закрытую вольтову дугу».

В последнее время появились дуговые лампы, в которых вольтова дуга заключается в закрытый стеклянный сосуд, а не находится в свободном воздухе. При таких условиях ослабляются вертикальные потоки воздуха, которые должны охлаждать катод, и, кроме того, весь газ, заключенный в стеклянном сосуде, находится при очень высокой температуре. Все это способствует поддержанию высокой температуры катода и, следовательно, способствует поддержанию дуги. Действительно, нормальная длина закрытой вольтовой дуги в 5 а равна 8 мм, и она не гаснет при такой большой длине, несмотря даже на непрерывные перемещения, составляющие одно из неудобств ламп с закрытой вольтовой дугой.

28. Выяснив в достаточной степени, от каких условий зависит возникновение и поддержание вольтовой дуги, я перейду в заключение к тем случаям, когда мы имеем дело с периодиче-

скими потуханиями и возникновениями вольтовой дуги, и укажу, как объясняются с принятой нами точки зрения некоторые особенности, наблюдаемые в этих случаях.

Простейший пример этого рода мы имеем в обычной вольтовой дуге переменного тока между угольными электродами. При каждом изменении направления тока дуга совершенно гаснет и в следующий полупериод она зажигается сама собой, ибо катод не успевает слишком сильно остынуть за тот незначительный промежуток времени, в течение которого дуга не горит.

Надо полагать, что в рассматриваемом случае периодическому возникновению вольтовой дуги в значительной степени благоприятствует то обстоятельство, что всегда катодом дуги является электрод, бывший в предшествовавший тому полупериод анодом и потому особенно сильно нагретый. Таким образом, надо полагать, что температура катода вольтовой дуги между углями вообще выше при переменном токе, чем при постоянном. Вероятно, благодаря этому именно обстоятельству в первом случае дуга может хорошо гореть в среднем при меньших вольтах, чем во втором случае.

Для примера я приведу данные для дуговых ламп в 15 а постоянного и переменного токов. Для лампы постоянного тока нормальная разность потенциалов между углями равна 42—43 в. Для лампы переменного тока эта же разность потенциалов (действующая) равна 28—30 в, что в случае синусоидального тока соответствует максимальной разности потенциалов в 40—42 в.

29. Как известно, венельтовский прерыватель работает хорошо только в том случае, когда проволока, опущенная в электролит, служит анодом. Исследование формы тока в цепи венельтовского прерывателя показывает, что в этом случае обрывание тока происходит в высшей степени резко. На кривой тока этому моменту соответствует вертикальный обрыв. В том же случае, когда проволока служит катодом, при прочих равных условиях, часть кривой тока, соответствующая периоду нарастания его, остается без изменения, но обрывание тока происходит не мгновенно: часть кривой, соответствующая этому периоду, имеет вид прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом, значительно меньшим 90°.

Нетрудно видеть, что и в этом случае все происходит так, как и должно происходить с принятой нами точки зрения. Действительно, ослабление тока в обоих случаях соответствует тому моменту, когда вследствие значительной плотности тока на поверхности электрода и связанного с этим значительного теп-

лового эффекта электролит оказывается отделенным от электрода газообразным слоем; при этом температура твердого электрода весьма велика. Если он служит катодом, то между ним и электролитом, естественно, вспыхивает дуга, которая обычно бывает весьма кратковременна, ибо жидкость не остается в покое и сильные потоки, в ней образующиеся, прерывают возникшее явление и вновь приводят в соприкосновение конец проволоки с электролитом. Если же проволока является анодом, то вольтова дуга, вероятно, и не возникает вследствие сравнительно низкой температуры катода — электролита.

Свечение же, которое в этом последнем случае наблюдается в момент перерыва тока, вероятно, есть результат возникающего искрового разряда. При искровом разряде количество протекающего по цепи электричества очень незначительно, так что возникновение искры ничтожно мало ослабляет эффект резкого уменьшения силы тока.

Вообще везде, где мы встречаемся с периодическим возникновением вольтовой дуги, уместны те соображения, которые были мной приведены для объяснения рассмотренных случаев.

II. Обратная электродвижущая сила вольтовой дуги

30. Существование обратной электродвижущей силы в вольтовой дуге до последнего времени многими оспаривается. Часто говорят лишь о постоянном члене формулы для разности потенциалов между электродами дуги. Резкий скачок потенциала при переходе от дуги к поверхности анода, легко обнаруживаемый при посредстве электрода — зонда, в таком случае объясняют не обратной электродвижущей силой, имеющей место у поверхности кратера, а особым «сопротивлением при переходе». Это «сопротивление при переходе» до последнего времени было какой-то фикцией, не имеющей физического значения. Но Айртон, выступившая защитницей этого взгляда, высказала предположение, что непосредственно к поверхности кратера прилегает тонкий слой дурнопроводящих паров угля. Этот слой и играет, по мнению Айртон, роль «сопротивления при переходе».

Все известные мне методы определения обратной электродвижущей силы вольтовой дуги относятся к двум категориям. Обыкновенно либо наблюдали наименьшую существующую в цепи электродвижущую силу, при которой дуга еще может гореть, либо же обратная электродвижущая сила дуги получа-

лась косвенным путем из определения разности потенциалов, силы тока и «сопротивления» дуги.

В первом случае причина ошибок кроется в том обстоятельстве, что существование в цепи некоторой электродвижущей силы, превышающей известный минимум, не есть единственно необходимое условие для поддержания вольтовой дуги. Так, например, при 100 в в цепи мы не в состоянии будем поддерживать это явление без искусственного подогревания катода, если сила тока будет порядка десятых

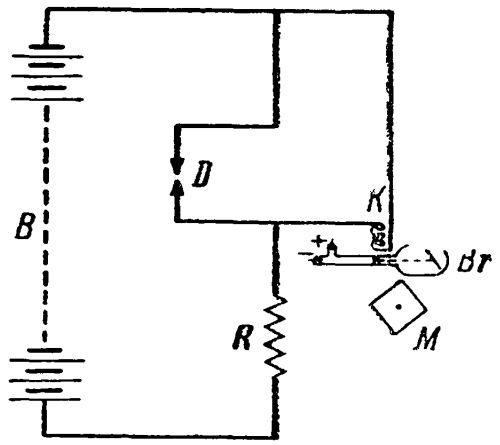


Рис. 9.

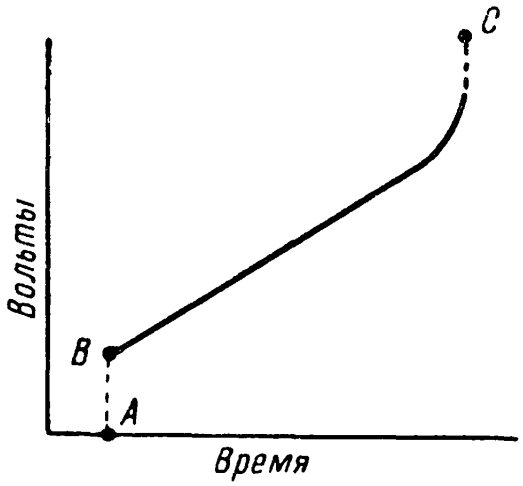


Рис. 10.

ампера и менее. В этом случае вольтова дуга гаснет столь быстро, что наблюдать ее непосредственно совершенно невозможно. Между тем она несомненно возникает на момент.

То же самое было и в опытах Эдлунда [14]; он, однако, принимал, что вольтова дуга и не возникает в тех случаях, когда она не поддерживается. При косвенном определении обратной электродвижущей силы дуги в огромном большинстве случаев делалась ошибка при исключении омического падения, для вычисления которого надо знать истинное «сопротивление» дуги.

31. Мне удалось [1] измерить обратную электродвижущую силу в вольтовой дуге, избегнув вышеупомянутых ошибок. Пользуясь трубкой Брауна в качестве весьма чувствительного осциллографа, я наблюдал кривую разности потенциалов у электродов вольтовой дуги в самый момент возникновения этой последней. Приборы я располагал так, как показано схематически на рис. 9. Здесь B — батарея аккумуляторов, D — вольтова дуга, R — дополнительное сопротивление, K — катушка с тонкой обмоткой, включенная в ответвление у вольтовой дуги, Br — трубка Брауна, M — система вращающихся зеркал, через посредство которых наблюдался светящийся след катодного пучка.

Как я и ожидал, кривая получилась подобная тому, что показано на рис. 10. Точка A соответствует разности потенциалов при сведенных электродах (она близка к нулю). В самый момент возникновения вольтовой дуги наблюдается быстрый скачок разности потенциалов до величины AB. При дальнейшем раздвижении электродов кривая плавно идет кверху и в момент потухания вольтовой дуги опять наблюдается скачок до C.

Таким образом, чрезвычайно быстрый скачок от A к B, а также перегиб кривой в точке B заставляют думать,

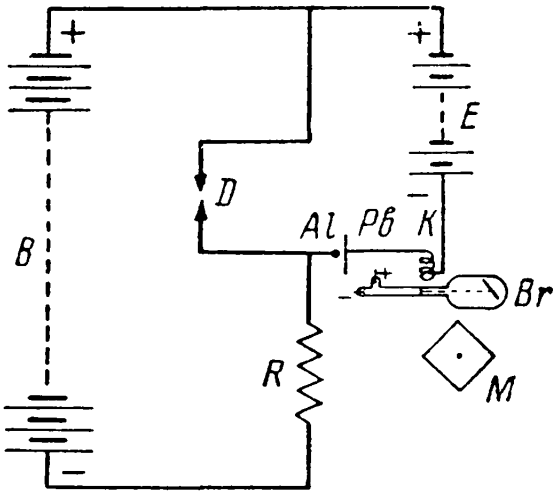


Рис. 11.

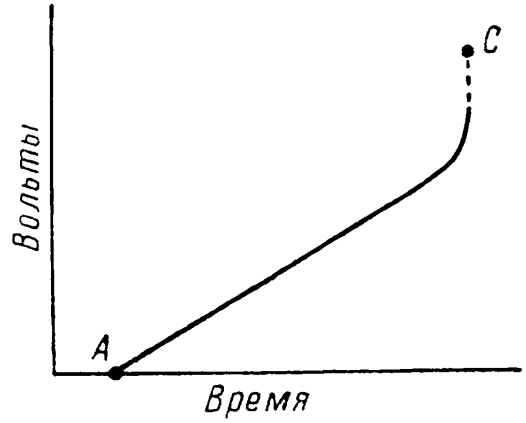


Рис. 12.

что вольтова дуга не может существовать при разности потенциалов, меньшей AB. Очевидно, эта предельная величина AB есть не что иное, как именно обратная электродвижущая сила вольтовой дуги.

32. Для того чтобы измерить величину ординаты AB, я применил метод компенсации. Именно, я ввожу в цепь вольтовой катушки K (рис. 9) некоторую электродвижущую силу, обратную приложенной к катушке разности потенциалов. Для того же, чтобы эта электродвижущая сила не могла вызвать тока в цепи вольтовой катушки при сведенных электродах (этот ток повлек бы за собой отклонение зайчика вниз от оси абсцисс), я располагаю в этой цепи алюминиевый клапан.

Получается схема, представленная на рис. 11. Здесь E — добавочная батарея, $Al|Pb$ — алюминиевый клапан. Очевидно, что при таком расположении приборов скачок AB уменьшится как раз на величину, соответствующую введенной в цепь электродвижущей силе E, и в частном случае, когда эта электродвижущая сила E будет равна обратной электродвижущей силе дуги, точка B совпадет с точкой A, т. е. интересующая нас кривая начнется от точки A и будет без перегиба (рис. 12).

Примененная в действительности схема была несколько сложнее. Она показана на рис. 13. Для компенсирования обратной электродвижущей силы дуги я пользовался частью разности потенциалов у зажимов источника тока, от которого питалась исследуемая вольтова дуга (батарея аккумуляторов в 110 в).

Именно, параллельно цепи дуги и независимо от нее включались два последовательно соединенных реостата R_1 и R_2. Меняя отношение $\frac{R_1}{R_1+R_2}$, можно было получать желаемую разность потенциалов у концов сопротивления R_1 (от 0 до 110 в). Эта разность потенциалов измерялась вольтметром V. Кроме вольтовой катушки K_1 брауновская трубка соединена была еще катушкой K_2, включенной в цепь последовательно с вольтовой дугой и расположенной перпендикулярно катушке K_1.

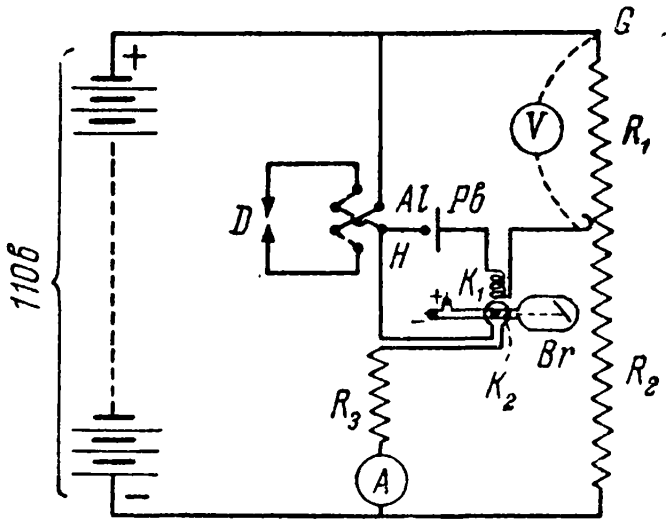


Рис. 13.

Под влиянием катушки K_2 зайчику на экране брауновской трубки сообщаются горизонтальные перемещения, так что кривая получается непосредственно на флюоресцирующем экране и нет надобности во вращающихся зеркалах. Форма получающейся кривой будет в этом случае, очевидно, уже не та, что раньше, ибо масштаб времени непостоянен: одновременно со скачком разности потенциалов (AB) имеет место и скачок в силе тока. Благодаря этому обстоятельству мгновенное перемещение зайчика (между точками A и B) будет происходить не вдоль ординаты, а наклонно к ней.

Для измерений по методу компенсации такой вид кривой удобнее, так как в этом случае при полном компенсировании обратной электродвижущей силы дуги, точка B не сливается с точкой A, но лишь смещается вправо по оси абсцисс; а ввиду довольно значительных размеров зайчика это обстоятельство позволяется точнее измерять.

Что касается вольтовой дуги, то для нее применялся особый ручной регулятор, который был снабжен сильной пружиной, быстро разводившей электроды на такое расстояние, что вспыхнувшая на момент дуга гасла.

Во время измерений подбиралось такое отношение $\frac{R_1}{R_1+R_2}$, при котором компенсировался скачок зайчика по вертикальному направлению. Вольтметром измерялась разность потенциалов у концов сопротивления R_1 и, кроме того, определялось омическое падение между точками GH (при сведенных электродах). Вторая величина приводилась к силе тока, наблюденного по амперметру A при существовании возможно кратчайшей дуги D, и затем вычиталась из первого наблюдения. Таким образом получалась величина обратной электродвижущей силы вольтовой дуги.

В табл. 4 приведены результаты моих измерений (в вольтах).

Таблица 4

+ \ —	Уголь без фитиля	Уголь с фитилем	Медь	Алюминий	Железо	Ртуть
Уголь без фитиля (9 мм) . . .	12	14	16	16	16	6
Уголь с фитилем (10 мм) . . .	7	6	—	—	—	—
Медь (5 мм)	9	—	8	—	15	—
Алюминий (5 мм)	8	—	—	16	—	—
Железо (8 мм)	10	—	17	—	16	—
Ртуть	11	—	—	—	—	—

При всех этих определениях ток в случае сведенных электродов был равен приблизительно 7.5 а.

Как видно из таблицы, обратная электродвижущая сила вообще значительно меньше той величины, какую обычно приписывают постоянному члену формул Эдлунда, С. Томпсона, Айртон и других.

Полученные мною величины того же порядка, что и результаты, полученные Дудделлем[12] косвенным путем. Для случая углей без фитиля он получил 12 в, как и я.

В случае разнородных электродов величина обратной электродвижущей силы вольтовой дуги зависит от направления тока. В случае угля с одной стороны и меди, алюминия или железа с другой. — обратная электродвижущая сила больше, когда уголь служит анодом.

33. Со времени возникновения гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги различные исследователи неоднократно пытались непосредственным опытом подтвердить эту гипотезу. Допуская ее, мы должны предположить, как это

сделал впервые Эдлунд[15], что после размыкания тока, питающего дугу, разность потенциалов между ее электродами не может мгновенно падать до нуля. Если, следовательно, прервав ток в цепи дуги, мы соединим ее электроды с каким-либо гальванометром, то через него должен пройти ток, аналогичный току поляризационному. Такова в общих чертах схема главнейших опытных попыток подтверждения гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги.

Первоначальные опыты дали положительные результаты. Однако по мере совершенствования методов наблюдения становилось очевидно, что эти результаты никоим образом не могут считаться убедительными, ибо в постановке опытов были допущены существенные недостатки: в большинстве случаев изоляция была несовершенна и в гальванометр попадал ток от главной цепи. Ясно, конечно, что это обстоятельство могло сильно исказить результаты наблюдений. Одним словом, по мере совершенствования методов исследования наблюдаемая обратная электродвижущая сила дуги оказывалась все меньше и меньше.

Наконец, последние исследования Блонделя[9] как будто бы совершенно идут вразрез с гипотезой об обратной электродвижущей силе дуги. В этих опытах ток, питающий дугу, периодически прерывался при посредстве специального вращающегося коммутатора. Пока главный ток был разомкнут, этот же коммутатор присоединял на момент цепь гальванометра к электродам дуги. Промежуток времени, протекавший от размыкания главного тока до замыкания цепи гальванометра, был приблизительно равен $\frac{1}{600}$ сек.

Замыкания и размыкания производились автоматически при посредстве быстро вращающегося коммутатора. Вообще, опыт был поставлен в высшей степени тщательно; были приняты все меры предосторожности. Блондель пришел к заключению, что если и существует в вольтовой дуге обратная электродвижущая сила, то она не может быть больше 0.16 в. Такая ничтожная величина, конечно, не может идти в сравнение с обычно принимаемой величиной обратной электродвижущей силы вольтовой дуги (от 10 до 30 в), и потому Блондель заключил, что этой обратной электродвижущей силы вовсе и не существует.

В 1902 г. я попытался обнаружить обратную электродвижущую силу вольтовой дуги[2]. С этой целью я наблюдал при помощи трубки Брауна форму кривых тока и разности потен-

циалов между углями вольтовой дуги в момент размыкания тока. Если взять вместо дуги простое безиндукционное сопротивление, то мы должны получить две подобные кривые. Если же в вольтовой дуге существует обратная электродвижущая сила, то она не исчезнет мгновенно после размыкания тока, и мы должны получить две кривые различной формы в том месте, которое соответствует моменту размыкания тока. Результат моего опыта был также отрицательный: я не мог обнаружить заметного различия в форме кривых.

34. В только что упомянутой работе своей я указывал, что отрицательные результаты опытов Блонделя и моих не должны быть рассматриваемы как довод против основательности гипотезы об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги. Я ссылался тогда на опыты Дудделля[13], который показал, что физические условия в вольтовой дуге — температуры отдельных частей дуги — чрезвычайно быстро следуют за изменениями силы тока.

Так, для случая 8-амперной дуги постоянного тока между углями без фитиля в силе света этой дуги ясно заметны колебания, когда на главный ток налагается переменный с амплитудой всего в 3% главного тока и с частотой в 4300 пер./сек.; при этом максимум силы света отстает от максимума силы тока менее, чем на 0.0001 сек. Колебания в силе света, испускаемого вольтовой дугой, должно рассматривать, как следствие колебаний температуры дуги и концов электродов.

Таким образом, опыты Дудделля показывают, что физические условия вольтовой дуги — температуры отдельных элементов дуги — чрезвычайно быстро следуют за изменениями силы тока.

По мнению Дудделля[12], обратная электродвижущая сила вольтовой дуги есть разность двух электродвижущих сил термического характера, возникающих в местах соприкосновения раскаленной газообразной среды дуги с концами электродов. Такое представление вполне согласуется с опытными данными. Опыты Дудделля прямо приводят к такому заключению. Так, например, для одного частного случая он нашел у катода дуги электродвижущую силу в 6 в, действующую в направлении главного тока, т. е. помогающую ему, и у анода дуги — электродвижущую силу в 17 в, противодействующую главному току. Разность этих электродвижущих сил и есть то, что практически получают, измеряя обратную электродвижущую силу вольтовой дуги.

На основании вышеизложенного понятно, что после размыкания тока, питающего дугу и обусловливающего разность температур между положительными и отрицательными электродами ее, эта разность температур должна очень быстро уменьшаться. А раз только она сделается равной нулю (это, повидимому, происходит в промежуток времени, меньший 0.0001 сек.), электродвижущая сила термопары «уголь—газ—уголь» также будет равна нулю, и мы получим отрицательный результат, пытаясь ее обнаружить.

35. В настоящее время не может быть никакого сомнения в том, что накаленные до очень высокой температуры металлы и уголь в сильной степени самопроизвольно излучают из себя отрицательное электричество. Какая-то сила гонит электроны из накаленных проводников в окружающее пространство. Чем выше температура проводника, тем больше эта сила, которую мы можем с полным правом назвать электродвижущей силой.

В вольтовой дуге мы имеем два накаленных электрода: катод и анод. Очевидно, у их концов должны существовать электродвижущие силы, обусловленные исключительно той дезинтеграцией вещества, которая имеет место при очень высокой температуре. При этом электродвижущая сила, появляющаяся в месте соприкосновения катода с дугой, будет гнать отрицательное электричество к аноду, т. е. эта электродвижущая сила будет действовать в направлении главного тока. У анода же, имеющего, вообще говоря, температуру значительно более высокую, должна существовать значительно бóльшая электродвижущая сила, которая будет гнать отрицательное электричество к катоду, т. е. будет противодействовать главному току. В общем, приложенной извне электродвижущей силе придется преодолевать обратную электродвижущую силу вольтовой дуги, равную разности этих двух сил.

Такое толкование результатов опытов Дудделля дано Штарком[26].

36. Итак, повидимому, в опытах Блонделя и моих отрицательный результат получился не потому, что в вольтовой дуге не существует обратной электродвижущей силы, а вследствие того, что после размыкания тока, питающего дугу, температуры катода и анода чрезвычайно быстро уравниваются, а вместе с тем делаются равными и те электродвижущие силы, которые несомненно должны существовать у накаленных катода и анода и которые направлены навстречу одна другой.

Таким образом, приключив к электродам дуги гальванометр спустя даже очень малый промежуток времени после размыка-

ния главного тока, мы ничего не заметим, хотя катод и анод некоторое время и сохраняют температуру достаточно высокую для того, чтобы можно было ожидать, что электродвижущие силы у катода и анода еще имеют весьма заметную величину.

Очевидно, эти электродвижущие силы могут проявить свое действие только в том случае, если мы каким-либо образом разделим их. Так, например, можно после размыкания главного тока предварительно заменить один из раскаленных элек-

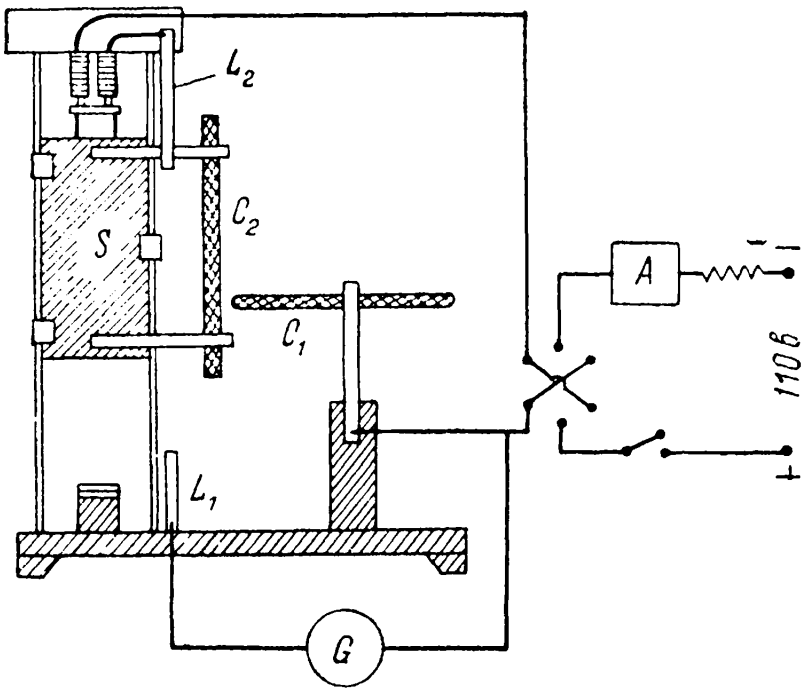


Рис. 14.

тродов дуги холодным и лишь после этого присоединить гальванометр. Тогда в цепи гальванометра будет действовать только та электродвижущая сила, которая имеет место у поверхности оставленного раскаленного электрода: она будет гнать отрицательное электричество через газообразную среду в промежутке между электродами в направлении от раскаленного электрода к холодному. Гальванометр должен обнаружить именно это направление тока.

37. Произведенный мной опыт[5] вполне подтвердил правильность такого рассуждения. Я воспользовался прибором, устроенным мною для показания особенного значения катода вольтовой дуги (см. § 16). Пришлось только изменить схему соединения отдельных частей и ввести гальванометр.

На рис. 14 схематически показано расположение опыта. Тележка S, могущая скользить вдоль вертикальных стеклянных направляющих и несущая вертикальный уголь C_2, удерживается электромагнитом в верхнем положении во время горения дуги

между концом угля C_1 и нижней частью угля C_2. После размыкания тока, питающего дугу, тележка S падает и гальванометр G при посредстве пластинки L_1 включается между углями C_1 и C_2. При этом против накаленного конца угля C_1 оказывается холодная поверхность угля C_2, т. е. мы имеем условия необходимые для того, чтобы могла проявиться электродвижущая сила, существующая у накаленного конца угля C_1.

Направление тока в гальванометре, пока конец угля C_2 не успел еще остынуть, всегда

Таблица 5

№	Ток через дугу в амперах	Приблизительное расстояние между углями C_1 и C_2 в мм	Знак угля C_1 в дуге	Отклонение гальванометра (деления шкалы)
1	30	1.2	—	+50
2	30	2.0	—	0
3	30	1.5	—	+1(—5)
4	25	1.5	—	+20
5	25	2.5	+	+40
6	30	1.2	+	более +250
7	25	2.0	+	+200
8	25	4.0	+	0
9	25	2.5	+	+45

соответствует снятию отрицательного электричества с накаленного электрода. При остывании электрода иногда наблюдается изменение направления тока. Это обстоятельство вполне объясняется влиянием газообразной среды ([27], § 98), и надо полагать, что оно совершенно было бы устранено, если бы опыт производился в весьма разреженном пространстве.

Естественно, конечно, что расстояние между электродами не должно быть чрезвычайно велико, ибо слой холодного воздуха представляет, повидимому, значительное сопротивление движущимся электронам.

Отклонение гальванометра получается, вообще, больше в том случае, когда раскаленный электрод был сначала анодом в дуге. Причина, конечно, та, что в этом случае его температура выше. Для примера я приведу (табл. 5), несколько полученных мной цифр (уголь C_1 — 16 мм, уголь C_2 — 10 мм диаметром).

В последнем столбце знак (+) соответствует снятию отрицательного электричества с накаленного угля C_1. В скобках со знаком (—) показано отклонение в другую сторону, наблюдавшееся иногда при остывании угля C_1.

Изоляция цепи гальванометра была достаточно совершенна: ток утечки от главной цепи вызывал отклонение гальванометра, не превышавшее доли деления шкалы.

Для того чтобы убедиться, что в описываемом явлении играет роль только некоторая причина, имеющая место у конца угля C_1, я обертывал верхнюю часть угля C_2 пластинкой меди. Таким образом, при замыкании цепи гальванометра против накаленного угольного электрода оказывался холодный электрод — медный. Характер наблюдавшихся при этом отклонений гальванометра нисколько не изменялся. Ускорилось только остывание угля C_1, что и понятно ввиду близости к этому углю весьма теплопроводящего тела.

Итак, надо полагать, что в вышеописанном опыте мне удалось наблюдать остатки тех электродвижущих сил, из которых слагается обратная электродвижущая сила вольтовой дуги.

38. Трудно, конечно, рассчитывать, чтобы по величине этих остатков можно было составить точное представление о величине электродвижущих сил, имеющих место в горящей вольтовой дуге. Но все-таки представляет некоторый интерес величина этих остатков электродвижущих сил. Можно, например, сравнить их величину с цифрой, полученной Блонделем (0.16 в).

Для того чтобы произвести хоть приблизительные измерения, я вводил в цепь гальванометра элемент, отрицательный полюс которого присоединялся к пластине L_1. Таким образом электродвижущая сила элемента вводилась в цепь навстречу измеряемой электродвижущей силе, и, подбирая соответственным образом первую, я компенсировал действие второй.

Опыт показал, что такое компенсирование достигалось при величине электродвижущей силы элемента от 1.5 до 2 в (при элементе Лекланше, обыкновенно, компенсация не была еще полной, при аккумуляторе гальванометр показывал маленькое отклонение в другую сторону).

Необходимо иметь в виду, что та электродвижущая сила, действие которой я пытался скомпенсировать, быстро изменялась в течение опыта от некоторой начальной величины до нуля. Это изменение обусловливалось быстрым остыванием раскаленного конца угля C_1. Таким образом, можно думать, что величина электродвижущей силы компенсирующего элемента позволяет нам судить лишь о некоторой средней величине искомой электродвижущей силы. Но последняя в конце концов становится равной нулю. Значит, она в начале, т. е. в момент

замыкания цепи гальванометра, была более электродвижущей силы элемента, т. е. более 1.5—2 в.

Полученая мною величина значительно больше того, что получил Блондель для обратной электродвижущей силы дуги (0.16 в). Представляется в высшей степени правдоподобным, что при тех высоких температурах, с которыми мы встречаемся в горящей вольтовой дуге, констатированные мной электродвижущие силы у положительного и отрицательного электродов дуги имеют в несколько раз бо́льшую величину (по Дудделлю, — около 17 и 6 в для одного частного случая).

Итак, по моему мнению, вопрос о существовании обратной электродвижущей силы в вольтовой дуге надо считать решенным в положительном смысле.

III. О наименьшей электродвижущей силе, необходимой для питания вольтовой дуги [6]

39. Так как в дальнейшем изложении мне придется говорить о вольтовой дуге, возникающей при несколько необычных условиях, то я считаю необходимым предварительно установить, какой именно вид разряда через газ я буду называть вольтовой дугой. В этом отношении я желаю держаться характеристики вольтовой дуги, которую дает Дж. Дж. Томсон ([27], § 213). Он говорит: «В электрической искре и в разряде с острия разность потенциалов между электродами равна нескольким сотням вольт, в то время как сила тока составляет всего лишь долю миллиампера; в случае же, к рассмотрению которого мы теперь приступаем, в вольтовой дуге, где электроды находятся в накаленном состоянии, разность потенциалов значительно меньше, в то время как ток сильнее в очень большое число раз и часто измеряется многими амперами».

40. На основании соображений, которые изложены на предыдущих страницах, надо полагать, что величина наименьшей электродвижущей силы, необходимой для питания вольтовой дуги при данных условиях, зависит главным образом от двух обстоятельств.

Во-первых, величина электродвижущей силы должна быть подчинена тому условию, чтобы количество тепла, образующегося в вольтовой дуге за счет электрической энергии, было достаточно для поддержания катода дуги в весьма накаленном состоянии. Одним из факторов электрической энергии,

расходуемой в дуге, является разность потенциалов между углями. Электродвижущая сила в цепи всегда должна быть больше этой разности потенциалов.

Во-вторых, электродвижущая сила в цепи должна быть больше обратной электродвижущей силы вольтовой дуги. Обратная же электродвижущая сила дуги есть разность двух электродвижущих сил, имеющих место у поверхности катода и анода и направленных одна навстречу другой. Обыкновенно температура анода выше температуры катода дуги и потому результирующая электродвижущая сила дуги по направлению совпадает с направлением анодной электродвижущей силы, т. е. противодействует току. Ясно, конечно, что с уменьшением разности температур катода и анода должна уменьшаться и результирующая электродвижущая сила дуги; даже более, она должна переменить свой знак, т. е. должна сделаться прямой, а не обратной, если каким-либо способом сделать температуру катода выше температуры анода.

41. Представим себе, что у нас имеется цепь, в которой горит дуга между некоторыми электродами, например между угольными. Как известно, температура катода будет в этом случае около 2700°, температура анода около 3500°. В установившейся вольтовой дуге температура катода поддерживается за счет электрической энергии. Другими словами, при данных условиях, т. е. при данных электродах, расстоянии между ними, газе, давлении и т. д., сила тока и разность потенциалов должны быть совершенно определенные для того, чтобы развивалось определенное количество тепла в 1 сек.

Представим себе теперь, что в нашем распоряжении есть какое-либо средство для подогревания катода, помимо электрической энергии, расходуемой в дуге, или что мы можем просто как-нибудь уменьшить утечку тепла в стороны и тем самым улучшить утилизацию его для нагревания катода. В таком случае, конечно, необходимые для существования дуги температурные условия на поверхности катода могут быть достигнуты при меньшем расходе электрической энергии в дуге. В то же время и обратная электродвижущая сила дуги может уменьшиться, ибо, улучшая условия нагревания катода, мы тем самым способствуем уменьшению разности температур катода и анода.

Одним словом, есть полная вероятность предполагать, что, принимая меры к уменьшению охлаждения катода и улучшая приток к нему тепла от других частей дуги, мы можем значительно понизить необходимую разность потенциалов между

электродами, а следовательно, и необходимую электродвижущую силу в цепи. Если же применить совершенно посторонний источник для подогревания катода, то мы, повидимому, можем идти беспредельно в уменьшении электродвижущей силы, необходимой для питания вольтовой дуги.

42. Что касается улучшения утилизации тепла, развивающегося в вольтовой дуге, то в этом отношении опытные данные вполне согласуются с только что высказанными соображениями (см. § 27).

Так при данной длине дуги и данной силе тока разность потенциалов всегда меньше в случае углей с фитилем, чем в случае углей без фитиля. Я объясняю это тем, что в первом случае образуется «пламенная» дуга, т. е. дуга и концы углей окружены пламеобразной оболочкой, состоящей из раскаленных паров веществ, входящих в состав фитиля. Эта оболочка до некоторой степени предохраняет катод от потери тепла.

Как показала Айртон, шипение дуги, сопровождающееся внезапным падением разности потенциалов на 8—10 в, весьма тесно связаны с окислением электродов дуги в воздухе. В закрытом сосуде, без доступа кислорода, исчезают условия, необходимые для возникновения шипящей дуги.

По этому поводу Дж. Дж. Томсон говорит в § 223 вышеупомянутой книги: «Причину, почему процесс химического соединения должен стремиться понизить разность потенциалов между электродами дуги, мы можем видеть в том, что тепло, выделяющееся при сгорании концов электродов, должно способствовать поддержанию их в накаленном состоянии, так что не все количество энергии, необходимое для этой цели, должно теперь развиваться электрическим полем».

43. Я сделал попытку применить искусственное подогревание катода и таким образом понизить электродвижущую силу, необходимую для питания дуги. Для этого я воспользовался тем обстоятельством, что при сгорании угля в струе чистого кислорода поверхность угля накаливается до чрезвычайно высокой температуры. Как показали мои предыдущие опыты, достигаемая при этом температура настолько велика, что вольтова дуга самопроизвольно возникает без соприкосновения угольных электродов, концы которых сгорают в струе кислорода. Но в этих опытах я брал ток от цепи в 100—110 в (см. § 19).

Не изменяя по существу расположения опыта, я теперь попытался воспользоваться в качестве источника тока всего лишь несколькими аккумуляторами, соединенными последовательно.

Для накаливания концов углей я предварительно нагревал их до красного каления в пламени бунзеновской горелки, а затем вводил в промежуток между ними струю чистого кислорода. В одних опытах я подводил кислород по каналу вдоль одного из углей. В других опытах я подводил кислород сбоку при посредстве фарфоровой трубочки. Угли в кислороде довольно быстро сгорают, так что форма концов углей во время опыта сильно зависит от способа подведения кислорода.

Так, при подведении кислорода через канал в одном угле образуется коническая впадина в противолежащем конце другого угля. Если уголь с каналом взять меньшего диаметра, то конец его заостряется отраженным потоком раскаленного кислорода и принимает коническую форму. Я несколько вдвигал конец угля с каналом в коническую впадину на конце другого, более толстого, угля и этим достигал наивысшей степени каления концов электродов.

Довольно трудно точно определить размеры «действующей» поверхности электродов, т. е. той поверхности, которая была сильно накалена и могла, повидимому, служить местом перехода тока из угля в газ и обратно. Судя на глаз, можно оценить «действующую» поверхность каждого угля в 2—3 см^2. Расстояние между поверхностями катода и анода было от 2 до 4 мм. Более точно описать условия опыта затруднительно потому, что угли быстро сгорали.

В условиях моего опыта оба электрода (и катод, и анод) накаливались, повидимому, одинаково. Нагревать один только катод мне не удалось, потому что приходилось подводить кислород очень мощной струей.

Всегда можно было констатировать прохождение довольно сильного тока через промежуток между раскаленными концами углей. Наибольшие силы тока, которые мне удалось достигнуть, были следующие:

Электродвижущая сила в цепи (вольты)	Сила тока (амперы)
6	5
4	3
2	2

Качественно условия прохождения тока через раскаленную газообразную среду в моих опытах ничем по существу не отличаются от тех, которые мы наблюдаем в обычных вольтовых дугах. Вид разряда через газ, наблюденный мной, вполне

подходит под характеристику вольтовой дуги, принадлежащую Дж. Дж. Томсону и приведенную в § 39: мы здесь имеем сравнительно очень сильный ток при небольшой разности потенциалов между электродами. Поэтому я полагаю, что описанные опыты подтверждают вышеприведенное предположение мое, согласно которому разряд типа вольтовой дуги может быть получен при сколь угодно малой электродвижущей силе в цепи.

IV. Нарушение симметрии переменного тока в цепи вольтовой дуги

44. Нарушение симметрии переменного тока в случае вольтовой дуги между разнородными электродами было наблюдаемо еще в 1882 году Жаменом и Маневрье. Затем этим вопросом занимались Сахулка, Аронс, Ланг, Эйхберг и Каллир, Блондель [24, 7, 21, 16, 10].

Результаты опытов всех исследователей, занимавшихся настоящим вопросом, сводятся к тому, что, вообще говоря, самое незначительное несходство электродов, между которыми образуется вольтова дуга переменного тока, влечет за собой нарушение его симметрии. Можно даже сказать, что весьма трудно получить такую дугу переменного тока, при которой не нарушалась бы его симметрия. В случае, например, тождественных угольных электродов симметрия тока может сохраниться ненарушенной только при горизонтальном расположении углей. Если же они, например, вертикальны, то верхний уголь, окруженный восходящими потоками воздуха, накаленного от соприкосновения с нижним углем и с самой дугой, будет иметь среднюю температуру более значительную, чем нижний.

Следовательно, с верхнего электрода дуги будет более легко сниматься отрицательное электричество, и потому в цепи должно преобладать то направление тока, при котором верхний уголь является катодом. Так в действительности это и происходит.

45. Нарушение симметрии переменного тока в цепи вольтовой дуги особенно резко в том случае, когда электроды дуги взяты из разных материалов. В этом случае особенное значение, повидимому, имеет различие теплопроводностей веществ электродов. В случае электродов угольного и металлического диссиметрия может доходить до того, что совершенно задер-

живается то направление тока, при котором металл оказывается катодом.

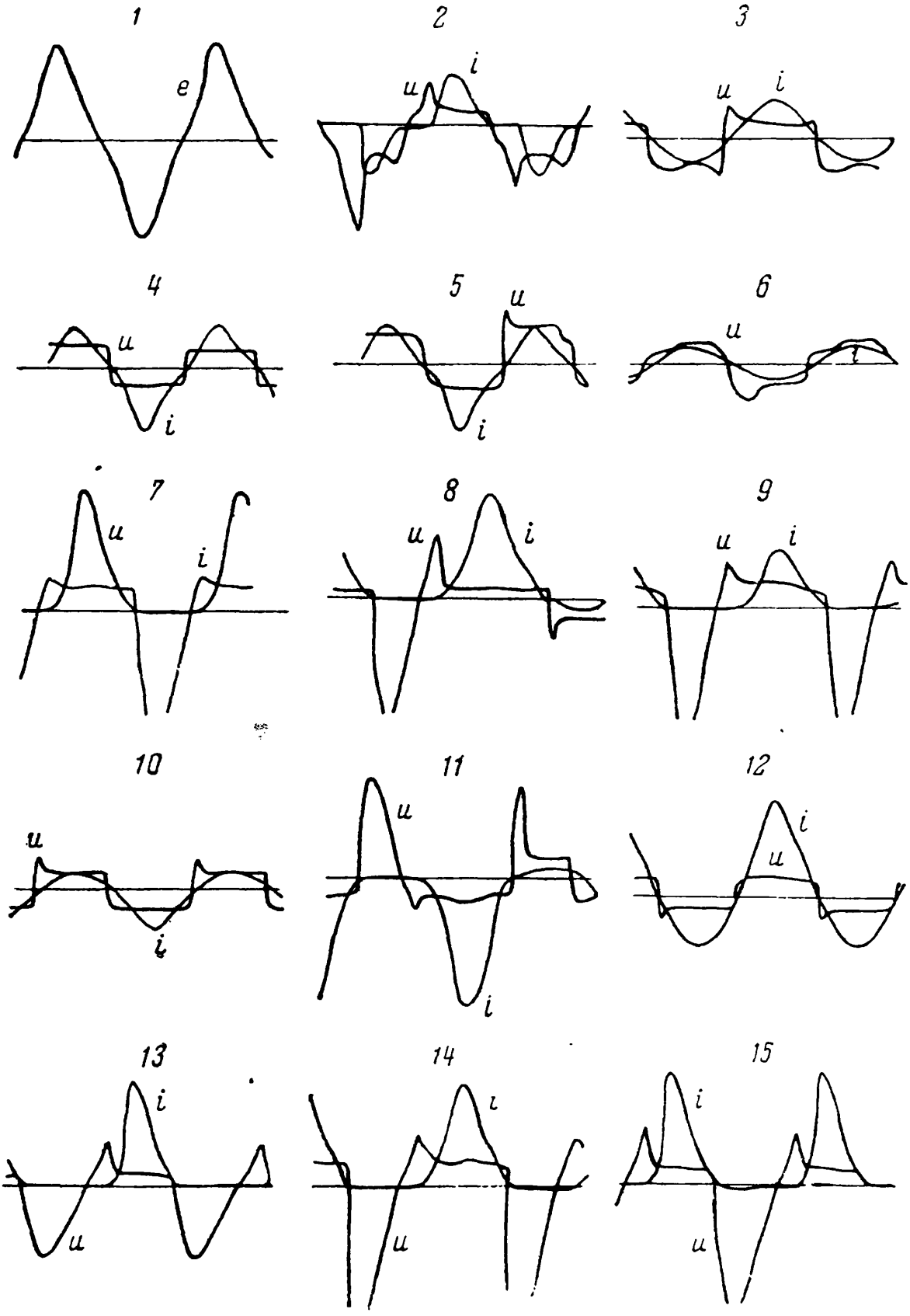


Рис. 15.

В этом отношении особенно ценны наблюдения Блонделя. Он исследовал вольтову дугу переменного тока между углем с одной стороны и медью, алюминием и железом с другой сто-

роны. На рис. 15 представлены интересные кривые, полученные Блонделем с помощью его осциллографа. Кривая 1 представляет собой электродвижущую силу в цепи (e). Далее, кривые i суть кривые силы тока, а u — кривые разности потенциалов между электродами дуги. Кривые *2—9* относятся к случаю угля и меди, кривые *10—11* — к случаю угля и алюминия и кривые *12—15* — к случаю угля и железа. На основании своих опытов Блондель установил два типичных режима, при которых может происходить горение вольтовой дуги переменного тока между углем и металлом.

1-й режим. Короткая дуга (не длиннее 1 мм). Сюда относятся кривые *2—6*, *10*, *12*. В этом случае наблюдается вообще очень незначительная диссиметрия; наиболее резко она заметна на рис. 12 (уголь, железо).

2-й режим. Длинная дуга (более 1 мм). Сюда относятся *7—9, 11, 13—15*. При этом режиме наблюдается сильная диссиметрия кривой тока: в большинстве случаев совершенно задерживается одно из направлений тока (всегда ослабляется то направление, при котором уголь служит анодом).

Объяснение надо, очевидно, искать в большой теплопроводности металлического электрода, благодаря чему его конец успевает быстро охлаждаться. Однако при очень коротких дугах металлический электрод должен во время перерывов тока нагреваться вследствие излучения тепла из близлежащего раскаленного конца угольного электрода. Поэтому при малом расстоянии между электродами дуга может возникнуть и в том случае, когда металл служит катодом, хотя ток все-таки будет при этом слабее, чем при угле — катоде. Но при раздвигании электродов, очевидно, наступит такой период, когда нагревание металла излучением тепла с угля будет недостаточно для того, чтобы дуга могла возникнуть при металле — катоде, и тогда должна обнаружиться резкая диссиметрия — полное задержание одного направления тока.

46. Как известно, выпрямитель Хьюитта [18], предназначенный для трехфазного тока, состоит в общих чертах из стеклянного шара с разреженным пространством (рис. 16). Внутри шара находятся четыре электрода. Три тождественных электрода I, II и III, впаянных в верхнюю часть шара, оканчиваются железными колоколообразными частями. Эти электроды присоединяются к трем зажимам цепи. Четвертым электродом служит ртуть, наливаемая на дно шара и соединяющаяся через полезное сопротивление с нейтральной точкой.

Во время работы выпрямителя ртуть служит общим катодом для вольтовых дуг, последовательно возникающих в соответствующие моменты между ртутью с одной стороны и электродом I, II и III с другой стороны. Размеры электродов I, II и III выбираются таким образом, чтобы температура их не была чрезмерно велика. Поэтому железные электроды не могут служить катодами дуг и всегда оказываются только анодами. По этой же причине дуги никогда не вспыхивают между какими-либо двумя железными электродами, хотя в этом случае разность потенциалов больше, чем между ртутью и любым из них. Выпрямитель работает непрерывно, ибо в силу комбинации трехфазного тока на поверхности ртути непрерывно поддерживаются условия, необходимые для возникновения и существования дуг (см. § 11); другими словами, всегда некоторый элемент поверхности ртути поддерживается при достаточно высокой температуре, так как прежде, чем погаснет одна дуга, возникнет другая и т. д.

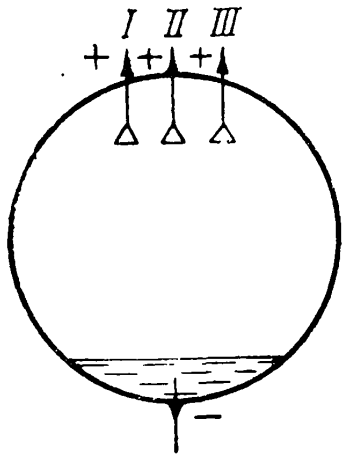


Рис. 16.

Эти возникающие без перерыва дуги и поддерживают ртутный катод в «активном» состоянии. Через полезное же сопротивление идет ток постоянного направления от ртути к нейтральной точке.

V. Практические приложения свойств катода вольтовой дуги

47. Весьма часто технические применения вольтовой дуги переменного тока затрудняются тем обстоятельством, что она неустойчива и легко гасится. Это имеет, например, место, когда один или оба электрода дуги металлические. Причина неустойчивости дуги в этом случае очевидна. Слишком велико охлаждение электродов за время перерыва тока, а при наличии холодного катода дуга не может вновь возникнуть без соприкосновения электродов.

На основании соображений, изложенных в первой части настоящей статьи, легко можно устранить неустойчивость дуги. Стóит только искусственно подогревать один или оба электрода, смотря по тому, довольствуемся ли мы одним направлением или желаем использовать оба направления переменного

тока. Можно также, пользуясь специальной комбинацией трансформаторов и реактивных катушек или просто специальным трансформатором, применить добавочный угольный электрод, который служит только катодом в течение обоих полупериодов переменного тока. Таким образом, дело сводится к применению либо вспомогательной дуги (для подогревания катода основной дуги), либо вспомогательного электрода. Нижеследующие схемы поясняют сказанное.

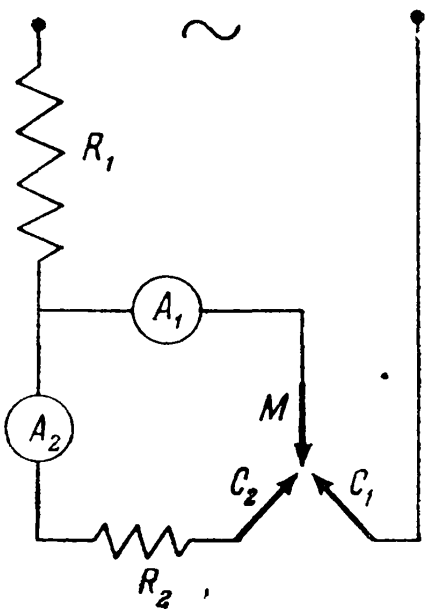


Рис. 17.

48. Простейшая схема с одной вспомогательной дугой представлена на рис. 17. Здесь M есть металлический электрод, C_1 и C_2 — угольные электроды. Основная дуга горит между M и C_1, вспомогательная — между C_1 и C_2. Реостаты R_1 и R_2 подбираются таким образом, чтобы вспомогательная дуга поглащала как можно меньше энергии сравнительно с основной дугой.

В одном частном случае, например, через вспомогательную дугу проходил ток в 3 а. При этом основная дуга (электрод M был железный) горела чрезвычайно устойчиво при 10 а.* Длина ее была от 7 до 10 мм. Без вспомогательной дуги основная немедленно гаснет. Вообще при переменном токе дуга между железом и углем весьма неустойчива при силе тока менее 25—30 а. Для зажигания основной дуги нет надобности сближать M и C_1. Достаточно только зажечь вспомогательную дугу сближением C_1 и C_2. Основная затем автоматически вспыхивает, ибо электрод C_1 накален.

Очевидно, конечно, что в этой схеме утилизируется только одно направление переменного тока, именно то, при котором искусственно нагреваемый электрод служит катодом.

Реостаты R_1 и R_2 можно заменить реактивными катушками.

49. На рис. 18 показана схема для получения вольтовой дуги переменного тока между двумя металлическими электродами M_1 и M_2. Для подогревания их в этом случае применяются две вспомогательные дуги постоянного тока: одна между C и M_1, другая между C и M_2. Здесь C — угольный электрод. D есть динамо постоянного тока или батарея аккумуляторов. К углю

* Амперметры тепловые.

C присоединяется отрицательный полюс ее. Положительный же присоединяется к середине реактивной катушки, две половины которой суть K_1 и K_2. R_1 есть реостат или реактивная катушка, R_2 есть реостат. В описываемой схеме утилизируются оба направления переменного тока.

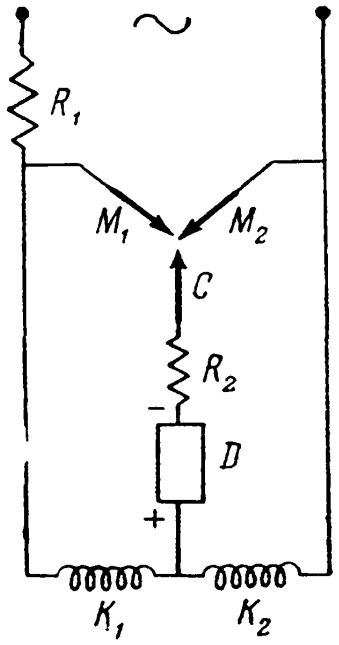


Рис. 18.

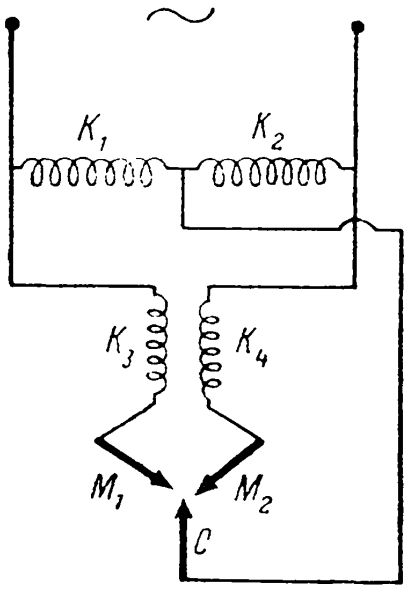


Рис. 19.

50. Применение вспомогательного электрода показано на рис. 19. Здесь также утилизируются оба направления переменного тока, но дуга горит по очереди между углем C и металлом M_1, а затем между C и металлом M_2. При этом уголь всегда служит катодом. K_1 и K_2 — две последовательно соединенные секции реактивной катушки или специального трансформатора, K_3 и K_4 — отдельные секции второй реактивной катушки, назначение которой состоит в том, чтобы, с одной стороны, ограничивать известным образом ток, питающий дугу, и, с другой стороны, чтобы предотвратить опасность короткого замыкания между M_1 и M_2.

51. Предыдущая схема дает достаточно устойчивую дугу. Можно ее еще улучшить, обеспечив нагревание вспомогательного угольного электрода. Этого можно достигнуть, образовав еще вспомогательную дугу между этим угольным электродом и другим таким же.

На рис. 20 представлена схема подобного устройства. Здесь применяется специальный трансформатор. K_1 — его первичная обмотка; K_2, K_3, K_4 — три секции вторичной обмотки; M_1 и M_2 — металлические электроды; C_1 и C_2 — вспомогательные угольные электроды. Вспомогательная дуга горит между C_1 и

C_2. Основная же дуга в течение одного полупериода падает из катода C_1 на металл M_1, а в течение следующего полупериода — из катода C_2 на металл M_2. Назначение реостатов R_1, R_2 и R_3 ясно само собой. Таким образом, в этой схеме мы имеем комбинацию вспомогательных электродов и вспомогательной дуги. Ясно, конечно, что вспомогательная дуга должна брать сравнительно мало энергии.

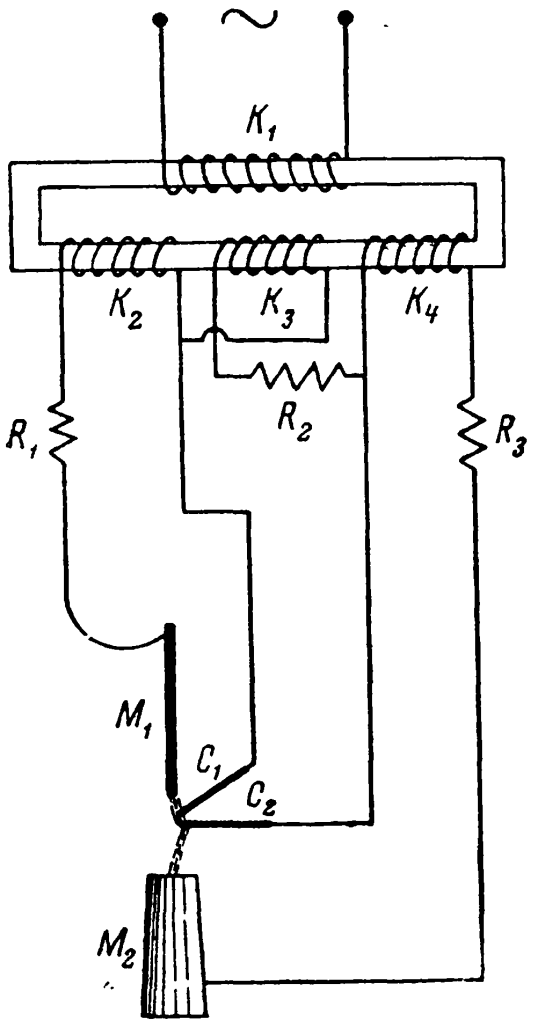


Рис. 20.

52. Мы рассмотрели на предыдущих страницах наиболее типичные схемы. Можно, конечно, их варьировать разными способами и получать новые

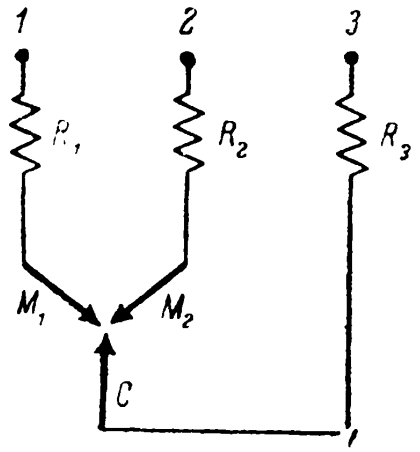


Рис. 21.

комбинации. Я в заключение приведу только еще одну схему (рис. 21), которая предназначена для трехфазного тока и интересна в том отношении, что здесь получается довольно сложная комбинация вспомогательного электрода и вспомогательной дуги. Концы металлических электродов M_1 и M_2 нагреваются дугами, возникающими между углем C и каждым из них; при этом в некоторые моменты вспыхивает дуга непосредственно между M_1 и M_2.

53. Описанные схемы могут найти применение, между прочим, для получения света, богатого какими-либо одними лучами, например ультрафиолетовыми и т. п.

Но особенное значение эти схемы могут иметь для электрического паяния и отливки непосредственно переменным током. До настоящего времени для этой цели пользуются исключи-

тельно постоянным током, что при нынешнем распространении переменных токов является неудобством, ограничивающим применение электрического паяния и отливки. Можно, конечно, трансформировать токи переменные в постоянные, но это невыгодно отражается на экономической стороне дела. Применение вспомогательных дуг и электродов устраняет эти неудобства и позволяет работать непосредственно от цепи переменного тока.

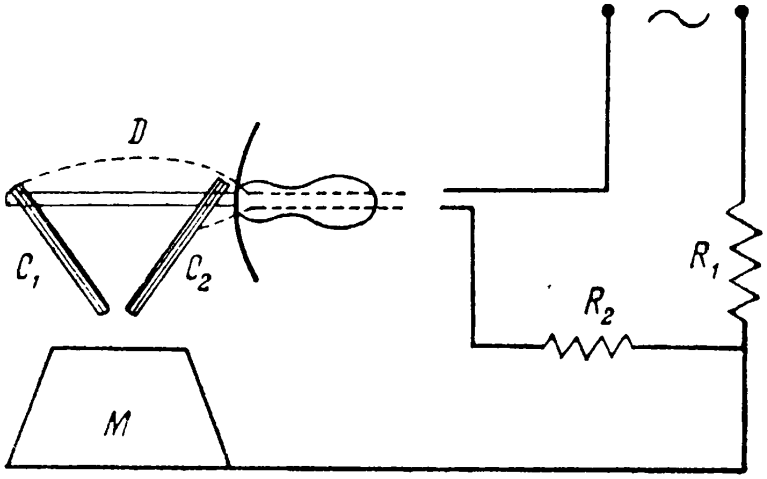


Рис. 22.

Для электрического паяния проще всего пользоваться схемой, представленной на рис. 17. При этом угли C_1 и C_2 вставляются в специальный ручной угледержатель. На рис. 22 схематически показано расположение приборов для электрического паяния. D есть ручной угледержатель с углями C_1 и C_2, M — обрабатываемый предмет. При работе нет надобности приводить уголь C_1 в соприкосновение с обрабатываемым предметом, так как дуга проскакивает через воздух сама. Весьма полезным для дела оказывается то обстоятельство, что в основной дуге анодом всегда служит обрабатываемый металл. Поэтому на нем выделяется значительное количество тепла, что как раз существенно для этого способа.

Для электрических отливок может быть применена схема, представленная на рис. 20, и вообще всякая другая, в которой фигурируют два металлических электрода.

Литература

[1] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 2, 1902.
[2] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 5, 1902.
[3] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 35, в. 5, 1903.
[4] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 35, в. 9, 1903; т. 36, в. 3, 1904.
[5] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 36, в. 1, 1904.
[6] Миткевич В. Ф., ЖРФХО, ч. физ., т. 36, в. 8, 1904.
[7] Arons L., Ann. der Physik und Chemie (Wied. Ann.), Bd. LVII, 1896.
[8] Ayrton. The electric arc. London, 1903.
[9] Blondel A., Comptes Rendus, t. CXXV, 1897.
[10] Blondel A., Comptes Rendus, t. CXXVIII, 1899.

[11] Dewar J., Proc. Royal Society, vol. XXXIV, 1882.
[12] Duddell, Electrician, № 1220, 1901, October.
[13] Duddell, Journ. of the Inst. of El. Eng., 1901, February.
[14] Edlund E., Ann. der Physik und Chemie (Pogg. Ann.), Bd. CXXXIII, 1868.
[15] Edlund E., Ann. der Physik und Chemie (Pogg. Ann.), Bd. CXXXIV, 1868.
[16] Eichberg F., Kallir L., Sitzungsber. d. W. A., Bd. III, 1894.
[17] Fleming J., Proc. Royal Society, vol. XLVII, 1890.
[18] Hewitt, Electr. World, vol. XLI, 1903.
[19] Jamin J., Maneuvrier G., Comptes Rendus, t. XCV, 1882.
[20] Kaufmann W., Ann. der Physik und Chemie (Wied. Ann.), Bd, LXI, 1897.
[21] Lang V., там же.
[22] Luggin H. Centralblatt für Elektrotechnik, Bd. X, 1888.
[23] Rosetti M., La Lumière Électrique, vol. I, 1879.
[24] Sahulka J., Sitzungsber. d. W. A., Bd. CIII, 1894.
[25] Simon S., Ann. der Physik und Chemie (Wied. Ann.), Bd. LXIX, 1899.
[26] Stark J., Ann. der Physik und Chemie (Drude's Ann.), Bd. XII, 1903.
[27] Thomson J. J., Conduction of electricity through gases. Cambrige, 1903.
[28] Thomson J. J., Phil. Mag., vol. XLIV, 1897.
[29] Thomson J. J., Phil. Mag., vol. XLVIII, 1899.
[30] Trotter A., Proc. Royal Society, vol. LVI, 1894.
[31] Violle J., Comptes Rendus, t. CXV, 1892.
[32] Wiechert E., Ann. der Physik und Chemie (Wied. Ann.), Bd. LXIX, 1900.

АЗОТНАЯ КИСЛОТА ИЗ ВОЗДУХА

(Реферат сообщения)

Труды 1-го Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, состоявшегося в С.-Петербурге с 20 по 30 декабря 1907 года. Изд. Распоряд. ком. съезда, СПб., 1909, стр. 268—275. (Совместно с Л. И. Горбовым).

Докладчик (Горбов), изложив результаты работ по нитрификации (Пастер, Шлезинг и Мюнц, Виноградский и др.) и усвоению микроорганизмами газообразного азота воздуха (Гелльригель и Вильфарт, Виноградский, Бейеринк) и указав на малую вероятность того, чтобы земледелие могло практически воспользоваться их результатами (слишком большая сложность почвенных условий и громадное разнообразие микроорганизмов, населяющих почву, сопровождаемое напряженной борьбой за существование), присоединился к взгляду Крукса, по которому решение вопроса об искусственном добывании селитры безусловно необходимо для человечества уже в ближайшем будущем (вопрос о «быть или не быть»).

Затем Г. излагает историю электрических методов фиксации азота и перечисляет работы Пристлея, Кавендиша, Беттгера, Споттисвуда, Крукса, лорда Релея и более подробно останавливается на теоретических исследованиях Мутмана и Гофера, Броде, Шейера, Иеллинека, Нернста, Габера и Кёнига, посвящая наибольшее внимание разбору работы Нернста.

Из уравнения последнего [1]

$$\lg \frac{x}{\sqrt{\left(N-\frac{x}{2}\right)\left(O-\frac{x}{2}\right)}} =$$

$$= \lg 0.0249 - 2.148\,\frac{2200-T}{T} = -\frac{4725.6}{T} + 0.5441993,$$

где x — есть объемный процент окиси азота, N и O — объемный процент азота и кислорода в реагирующей газовой смеси, T — абсолютная температура опыта, следует: 1) что первым продуктом взаимодействия в смесях кислорода и азота обязательно считается окись азота; 2) что количество ее при данной температуре признается симметричной функцией от объемного состава смеси с максимумом при равных объемах O_2 и N_2; 3) что полное сжигание кислорода (азота) с превращением в окись азота допускается только при бесконечно высокой температуре, каковая не зависит от состава реагирующей газовой смеси, потому что предельная температура определяется выражением

$$0.5441993 + \frac{1}{2}\lg\sqrt{\left(N-\frac{x}{2}\right)\left(O-\frac{x}{2}\right)} - \lg x = 0;$$

4) что на основании левой части уравнения, т. е. из выражения

$$\lg\frac{x}{\sqrt{\left(N-\frac{x}{2}\right)\left(O-\frac{x}{2}\right)}},$$

должно бы ждать для воздуха этой предельной температуры при $x = 41.6$ (O в воздухе равен 20.8), а для смеси равных объемов кислорода и азота — при $x = 100$; 5) что уравнение признает тепло образования окиси азота постоянным; что нет такой низкой температуры, при которой не происходило бы соединения кислорода с азотом, а равно и распадения готовой окиси азота.

Г. не может признать эти положения окончательно установленными. Все известные окислы азота эндотермичны по отношению к газообразным кислороду и азоту и должны быть более устойчивыми при высоких температурах; с равным правом можно потому ожидать образования любого окисла азота, хотя бы, например, N_2O (Шейер*), как первого продукта взаимодействия его с кислородом, но, кроме того, можно допустить появление и какого-нибудь еще не изученного окисла, что и утверждает Ставенхаген.

Н. Меншуткин показал, что «индифферентные» растворители влияют на ход превращения, Броде нашел, что в кислороде дуга горит с пламенем, а в азоте без пламенной оболочки, Га-

* Закись азота найдена теперь Варбургом и Лейтгейзером при образовании окислов под влиянием тихого разряда.

бер и Кёниг наблюдали, что увеличение содержания кислорода повышает сопротивление в вольтовой дуге; все это не вяжется с симметричным влиянием O_2 и N_2. Если бы оно имело место, то следовало бы ждать для симметричных газовых смесей (например, 20% O_2 + 80% N_2 и 20% N_2 + 80% O_2) равенства процентов «окиси» азота, а это не сходится с данными Габера и Кёнига, наблюдавших, например, при воздухе 9.8% NO, а в «обратной» смеси — около 12.5% ее.

Температуры газовых смесей в дуге, вычисляемые на основании опытных процентов NO (данные Броде, Шейера, Габера и Кёнига), кажутся Г. (вместе с Габером и Кёнигом) слишком высокими и несогласными с условиями опытов. Постоянство тепла образования NO, т. е. независимость его от температуры, предполагает равенство теплоемкостей O_2, N_2 и NO; Г. считает это маловероятным, особенно имея в виду, что при низких температурах малоустойчивой является NO, легко превращающаяся в смесь кислорода и азота с выделением тепла, а при высоких — в смесь кислорода с азотом.

Повышение процентного содержания NO при малых давлениях, установленное Бринером и Габером с Кёнигом, напоминающее отношение систем из кислорода и фосфора, кислорода и мышьяка (Жубер), тоже косвенно не согласуется с формулой, потому что, согласно формуле, реакция не зависит от давления. В частности, в формуле не верны постоянные величины, потому что наибольшие вычисляемые из нее значения x при воздухе равны 37.80% (вместо 41.6%), а при смеси равных объемов кислорода и азота равны 63.64% (вместо 100%); при больших x становится отрицательным T, что не имеет физического смысла.

Наконец, нарастание процента NO при малых скоростях воздуха в дуге, наблюдавшееся и докладчиками, едва ли согласуется со скоростями образования и распадения NO, данными Иеллинеком. Г. не разделяет поэтому взгляда Боденштейна на работу Нернста и считает его уравнение чисто эмпирическим и едва ли приложимым к дуге (Варбург); оно позволяет лишь сделать заключение, что количество NO растет с температурой и что количество уловленных окислов будет тем больше, чем быстрее идет закалка продуктов реакции.

По мнению докладчика (Миткевича), основная задача, которая возникает при конструировании электрической печи для сжигания азота воздуха, заключается в том, чтобы обеспечить наиболее совершенную обработку газов, т. е. создать такие условия, при которых весь воздух, прогоняемый через печь, приходил бы в возможно тесное соприкосновение с высоковольтной

дугой. Смотря по тому, как именно разрешается эта задача, существующие печи М. делит на две категории: печи с неподвижной дугой и печи с подвижной дугой. В печах с неподвижной дугой обмен газов в объеме дуги обусловливается естественной или искусственной тягой. В печах с подвижной дугой обмен осуществляется главным образом благодаря тому, что вольтова дуга непрерывно изменяет свое положение и при этом захватывает новые и новые порции необработанного воздуха.

Что касается вопроса о сохранении продуктов реакции от распадения, которое неминуемо возникает при охлаждении газов, то для разрешения его необходимо вести охлаждение как можно быстрее.

Для осуществления большой скорости охлаждения газов вначале стремились дробить электрическую энергию, питая одновременно целый ряд вольтовых дуг малой мощности (порядка 100, 200, максимум 500 вт каждая). Так Дугал и Хауль применяли одиночные вольтовы дуги мощностью не более 200 вт при напряжении в цепи от 8 000 до 16 000 в. Каждая дуга помещалась внутри цилиндрической камеры с внутренним диаметром около 20 см и высотой около 80 см. Воздух вводился в камеру снизу и отводился вместе с продуктами реакции сверху.

Значительным шагом вперед была попытка Брэдлея и Левджоя, а затем Ковальского и Мосцицкого расположить в одной и той же камере большое число маломощных дуг. Брэдлей и Левджой (Компания по добыче газов из воздуха) работали на Ниагаре и применяли подвижные дуги. Их печь состояла из вертикального цилиндра, сквозь стенки которого проникали внутрь неподвижные электроды. Через реактивные катушки эти электроды были присоединены к одному полюсу генератора постоянного тока с напряжением в 10 000 в. Другой полюс генератора присоединялся внутри печи к вращающемуся с большой скоростью вертикальному валу с электродами в виде радиальных спиц. При прохождении концов спиц вблизи неподвижных электродов вспыхивали дуги мощностью порядка 30—40 вт каждая. При вращении вала дуги растягивались и гасли, на месте их возникали новые и т. д. Одновременно горело в печи в 10 квт до 300 дуг. В минуту возникало и гасилось до 400 000 дуг. Сквозь эту массу кратковременных дуг продувался воздух.

Ковальский и Мосцицкий работали в Веве с печью, которая тоже имела вид вертикального цилиндра с массой электродов,

проходящих через стенки цилиндра. Внутри него горели неподвижные дуги между этими электродами с одной стороны и центральным общим трубчатым электродом с другой стороны. Дуги питались высоковольтными переменными токами большой частоты (около 1000 пер./сек.). В печи в 45 квт горело одновременно 90 дуг (мощность дуги, следовательно, равна была 500 вт).

Применение дуг малой мощности оказалось практически непригодным в тех случаях, когда необходимо устроить печь или печи, рассчитанные на большие мощности, порядка сотен и тысяч киловатт, к которым неизбежно приходится прибегать, раз только желательно практически поставить дело фабрикации азотной кислоты. Печи с малыми дугами тут неприменимы ввиду их необычной громоздкости, значительной первоначальной стоимости и главным образом ввиду сложности и ненадежности их устройства, что, несомненно, должно сильно увеличивать расходы производства. Опыты показали, что и при горении одной дуги очень большой мощности могут быть достигнуты благоприятные результаты.

Первенство в деле устройства печей с одной дугой очень большой мощности принадлежит норвежским изобретателям Биркеланду и Эйде, заслуга которых заключается еще и в том, что они сумели добиться осуществления искусственной фабрикации солей азотной кислоты в очень широких размерах. Сущность устройства их печи заключается в следующем.

Дискообразная вольтова дуга, питаемая переменным током при напряжении в 5000—6000 в, горит в плоской круглой камере, образованной вертикальными шамотными стенками, расстояние между которыми порядка 5 см. Дискообразная форма дуги получается следующим образом.

Два длинных горизонтальных металлических электрода, охлаждаемых изнутри проточной водой, расположены в камере вдоль диаметра ее так, что концы их сходятся в центре камеры. Расстояние между концами электродов от 2 до 5 мм. Благодаря высокому напряжению это расстояние пробивается само собой и между концами электродов возникает очень короткая дуга. Дуга эта не остается на месте, но при помощи сильного п о с т о я н н о г о поля, перпендикулярного самой дуге, выдувается вверх или вниз в зависимости от направления тока в дуге.

При этом процессе выдувания дуги длина ее увеличивается, а концы ее, расходясь, скользят вдоль горизонтальных электродов. При достаточной длине дуги разность потенциалов между

электродами делается настолько большой, что вновь пробивается малое расстояние между концами электродов, вновь возникает короткая дуга, а длинная гасится вследствие внезапного уменьшения разности потенциалов в момент пробоя. Так как дуга движется в сильном магнитном поле с огромной скоростью (до 100 м/сек), то мы не видим отдельных положений дуги, а она представляется нам в виде огненного диска. Этот огненный диск вольтовой дуги как бы заполняет собой всю плоскую шамотную камеру. В больших печах Биркеланда и Эйде мощностью до 100 квт диаметр его доходит до 2 м. Обрабатываемый воздух вгоняется в камеру через отверстие в боковых стенках и отводится через каналы на периферии.

Три подобные печи, мощностью в 500—700 квт каждая, работали почти три года на опытной установке в Нотоддене (провинция Телемаркен в Норвегии). С осени 1907 г. там же начал функционировать новый завод кальциевой селитры, на котором установлены 32 гигантские печи, мощностью каждая в 1000—1100 квт. Одновременно работают таких 24 печи, а 8 являются запасными. Для питания этих печей в 4 км от Нотоддена сооружена гидроэлектрическая установка мощностью в 40 000 л. с. (на водопаде Свельгфос). В Нотодден передается 28 000 квт. Кроме того, для той же цели в настоящее время сооружается гидроэлектрическая установка на водопаде Рьюканфос мощностью в 127 000 л. с. (десять турбогенераторов, 12 700 л. с. каждый).

Из других печей, конструкция которых допускает сосредоточение в одной дуге очень большой мощности, М. упоминает следующие.

В печи Петерсона и в печи Мосцицкого, основанных на одном и том же принципе, также применяется магнитное поле для приведения вольтовой дуги в движение. Вольтова дуга образуется между двумя концентрическими кольцевыми электродами и затем приводится в быстрое движение при помощи магнитного поля, перпендикулярного плоскости колец. При движении дуги концы ее бегут по направляющим электродам. Получается от дуги впечатление вращающегося огненного плоского кольца, заполняющего промежуток между электродами. Сквозь это кольцо перпендикулярно его плоскости прогоняют обрабатываемый воздух.

Баденская содовая и анилиновая фабрика выработала электрическую печь, в которой неподвижная вольтова дуга горит вдоль длинной трубы, по которой прогоняется обрабатываемый воздух.

В печи А. И. Горбова и В. Ф. Миткевича неподвижная вольтова дуга, питаемая однофазным переменным, трехфазным или же постоянным токами высокого напряжения, горит таким образом, что верхняя часть пламени заполняет собой воронкообразную камеру, присоединенную непосредственно к холодильнику (например, в виде змеевика). Металлическая воронка и холодильник охлаждаются водой или маслом. Обрабатываемый воздух прогоняется сквозь воронку в холодильник и в своем движении засасывает вольтову дугу в холодильник. Таким образом, устье холодильника оказывается запертым огненной пробкой, сквозь которую должен пройти весь предназначенный для обработки воздух. Сверх того, при данном расположении достигается весьма быстрое охлаждение продуктов реакции, как только они выйдут из области дуги.

Химическая природа окислов азота, образующихся в печах, по Г., не может считаться окончательно установленной. Газы, выходящие из них, более или менее быстро желтеют, и этим объясняется общее убеждение, что первичным продуктом является NO, образующая далее с кислородом азотноватый окисел $2NO+O_2=N_2O_4$. Опыты Шейера, Ле Блана с Нираненом, докладчиков, а равно патент Баденской анилиновой и содовой фабрики показывают, что иногда реакция останавливается (?) на N_2O_2, а иногда идет и далее до N_2O_4 (?).

Улавливание окислов в Нотоддене Г. излагает по Биркеланду, Витту и Мутману. Отпускается с завода кальциевая соль пироазотной кислоты $Ca_2N_2O_7 \cdot 3\frac{1}{2} H_2O$ (Камерон и Робинсон), идущая как удобрение.

Выходы электрохимической азотной кислоты держатся большинством в секрете.

Как пример сравнительно легко осуществимых результатов докладчики приводят табличку данных для их печи при мощности дуги в 14 квт (ток трехфазный):

Объемный % NO	1.50	2.00	2.50	3.00	3.36
Граммы HNO_3 на 1 квт-час	56.0	55.0	53.2	46.0	35.0

Как видно, они того же порядка, что и данные Бриона для модели печи Мосцицкого при мощности дуги около 4 квт:

Объемный % NO	1.04	1.11	1.37	1.59	1.88	2.15
Граммы HNO_3 на 1 квт-час . . .	56.0	55.8	57.6	49.0	37.5	30.3

и, вероятно, сравнимы с данными других исследователей; по крайней мере, Ковальский и Мосцицкий имели 43.50 г HNO_3

на 1 квт-час, Биркеланд и Эйде — 44.66 г при 7—10 квт в дуге.

Наибольший, известный докладчикам, выход принадлежит Биркеланду, которым получено с дугой в 300 квт — 75.2 г HNO_3 на 1 квт-час при 1.07% окиси азота. Работают ли в Нотоддене со столь разбавленными газами, докладчикам неизвестно. По Витту и Клауди, эти газы содержат около 2% NO; по Ф. Ги, заводы работали одно время с выходом в 36.66 г HNO_3 на 1 квт-час. Проект нового завода в Нотоддене, упомянутого выше, принимает средний выход в 57.078 г HNO_3 на квт-час, или 0.5 т на квт-год (в 8760 часов), причем энергия, идущая на магнитное раздувание дуги (в больших печах, вероятно, не более 2% от энергии дуги), Биркеландом и Эйде, повидимому, не принимается в расчет.

Литература

[1] Nernst W., Zeitschr. anorg. Chem., Bd. XLIX, 1906.

О ГОРЕНИИ ВОЗДУХА В ВОЛЬТОВОЙ ДУГЕ

ЖРФХО, ч. хим., т. 45, в. 5, 1913, стр. 1109—1136.
(Совместно с А. И. Горбовым)

1. Несколько лет тому назад мы сделали на эту же тему доклад на 1-м Менделеевском съезде. Помещенный в извлечении в «Трудах Съезда»[1], он имел целью дать краткое представление об объеме вопроса и о попытках техники его разрешить.

Продолжая заниматься экспериментальным изучением процесса с печами возрастающей мощности и знакомясь с появляющимися в этой области работами других авторов, мы пришли к убеждению: 1) что в литературе имеются неясности по поводу некоторых в высшей степени простых соотношений тех опытных данных, с которыми экспериментатору приходится постоянно иметь дело, и 2) что в то время как горение воздуха в условиях, близких к теоретическим, изучено, повидимому, довольно подробно[13, 14], горение его в действительно существующих печах характеризуется слишком отрывочными данными, не дающими возможности сравнивать эти печи между собою и не позволяющими вывести сколько-нибудь определенных заключений о том, насколько удачно они справляются с поставленной задачей.

Целью настоящей статьи является введение некоторых новых понятий и главным образом попытка возможно точно описать тот процесс горения воздуха, который имеет место в технических приборах. Мы думаем, что предлагаемый нами метод изображения и сравнения результатов опыта позволяет с помощью некоторых численных величин дать качественную характеристику самих печей и тем, может быть, поставить сравнение их на правильный путь.

Из сказанного ясно, что мы не смотрим на наши заключения как на окончательные, полностью исчерпывающие предмет.

Опубликовывая их, мы желаем главным образом дать для будущих исследователей некоторую определенную точку отправления, идя от которой им, может быть, удастся выработать настоящую теорию технического процесса.

2. Основными величинами, имеющими техническое значение и одновременно характеризующими процесс, являются: а) мощность дуги в киловаттах — P; б) объем в куб. метрах — v, при 0°С и 760 мм рт. ст., продуваемого в течение определенного времени (h часов) через печь воздуха; в) процент окиси азота — c, который удается сохранить в выходящих из печей газах.* Чем больше первая величина, тем меньше (при данном запасе энергии) число печей, сжигающих воздух, и тем легче осуществимы управление и надзор за ними; чем больше объем продуваемого в единицу времени воздуха, при данной мощности P дуги, и чем выше процент сохраненной в них окиси азота, тем совершеннее использование энергии.

В целях сравнения отдельных опытов и печей между собою принято выражать результаты в виде выхода (в граммах) азотной кислоты — HNO_3 на каждый киловатт-час, потребляемый в дуге.

Эта величина получается таким образом. Объем окиси азота (в куб. метрах), извлеченный в данный промежуток времени из печи, равен $\frac{cv}{100}$, а так как молекула NO отвечает молекуле же HNO_3, то

$$\frac{cv \cdot 63 \cdot 10^6}{hP \cdot 100 \cdot 22400} = \frac{cv}{hP} \cdot \frac{225}{8} = G^{**}$$

дает количество HNO_3 в граммах, равное G, приходящееся на 1 квт-час. Кроме этой общепринятой величины, мы предлагаем ввести новую, а именно объем воздуха (в куб. метрах при 0°С и 760 мм рт. ст.), приходящийся на каждый киловатт дуги в течение одного часа.*** Мы обозначаем его δ. Таким образом

$$\delta = \frac{v}{hP}.$$

---

* Собственно говоря, выходит смесь окислов азота, которая так или иначе улавливается (водой, щелочью, серной кислотой), но ее принято пересчислять на окись азота.

** 63 — вес молекулы HNO_3; 10^6 — число куб. см в 1 куб. м и 22400 — число куб. см, занимаемых при нормальных условиях (0° С и 760 мм рт. ст.) одной газообразной грамм-молекулой. Для вычислений, подобных настоящим, это число может быть принято, ибо оно отличается от истинного только на 0.067%.

*** Начиная с 1907 г., эта величина отмечается нами по инициативе одного из наших сотрудников — Г. А. Люста.

При введении δ предыдущее выражение превращается в

$$G = \frac{225}{8} c\delta \qquad (1)$$

или

$$\frac{8}{225} G = c\delta. \qquad (1\text{ bis})$$

Невольно обращает на себя внимание то обстоятельство, что полученная формула подобна закону Бойля—Гей-Люссака

$$RT = pv$$

не только по внешнему виду, но и по смыслу, входящих в нее величин. Действительно, R, представляющему коэффициент, численное значение которого зависит от единиц измерения, отвечает численный же коэффициент, величина которого тоже зависит от принятых единиц. Абсолютная температура пропорциональна работе; ей же пропорциональна величина G; и, например, утверждение проф. Ф. Ги[8], что в печах Шёнерра утилизируется всего 3% энергии, значит, что в них на 1 квт-час получается 75.6 г HNO_3.* Наконец, c пропорционально парциальному давлению окиси азота, а δ, естественно, отвечает v.

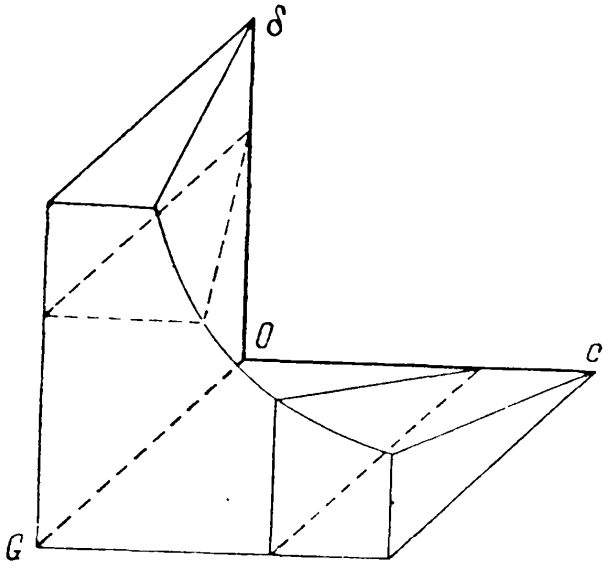


Рис. 1.

3. Само собою ясно, что соотношение

$$c\delta = \frac{8}{225} G$$

может быть построено и в пространстве (рис. 1), а отсюда вытекают три главных метода изображения результатов опыта:

а) можно по ординатам наносить G, а по абсциссам c; этот способ впервые, повидимому, применен Рашем [16]; более систематично он использован Брионом [5]; б) можно по ординатам откладывать δ, а по абсциссам c; в) можно по ординатам откладывать δ, а по абсциссам G.

---

* 1 квт-сек. = 240 кал., тепло же образования 1 г-мол. NO равно 21600 кал. и $\frac{240 \cdot 3600 \cdot 3 \cdot 63}{100 \cdot 21600} = 0.4 \cdot 63 \cdot 3 = 75.6$, откуда видно, что процент использованной в данной печи энергии равен $\frac{G}{25.5}$.

Оба последних способа, насколько нам известно, никем до сих пор не применялись.

Можно затем на каждой из подобных диаграмм нанести и проекции сечений характеристичной поверхности $c\delta = \frac{8}{225} G$ плоскостями, параллельными плоскости диаграммы. Так, например, можно на диаграмме G—c нанести δ, которые будут тогда представлять семейство прямых, сходящихся в начале координат; или на диаграмме δ—c нанести линии равных G, которые представятся в виде равносторонних гипербол с осями ассимптотами и т. д. (рис. 2). Ниже мы приводим такие диаграммы.

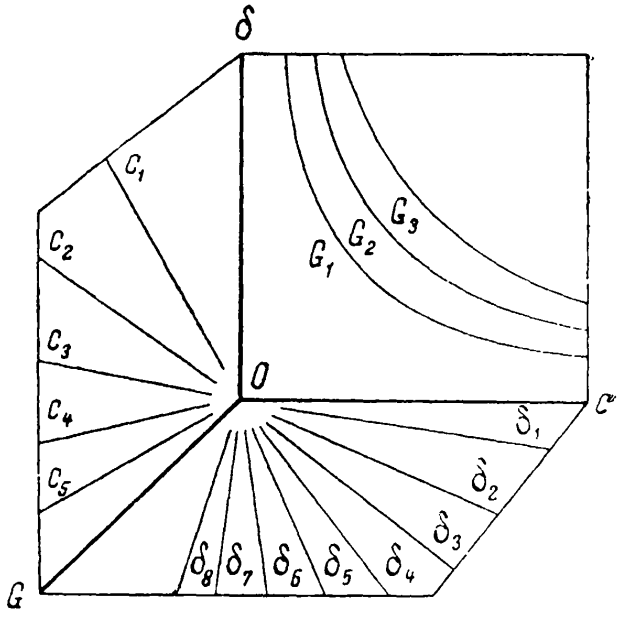


Рис. 2.

4. Известно, что вольтова дуга есть один из случаев прохождения электрического тока через газообразную среду. Для ее возникновения и существования прежде всего должно быть соблюдено основное условие, состоящее в том, чтобы поверхность электрода-катода была нагрета до достаточно высокой температуры. Вместе с тем должна быть достаточно высока и температура газообразной среды вдоль пути тока, т. е. вдоль вольтовой дуги, где расходуется электрическая энергия.

Всякое обстоятельство, могущее влиять на температуру газов и электродов, отражается в большей или меньшей степени как на общем характере вольтовой дуги, так и на ее устойчивости. В электрических печах, служащих для сжигания воздуха в пламени вольтовой дуги, на характер последней влияют: конструкция печей, подвижность или неподвижность дуги, скорость продувания воздуха и способ подведения его, материал, из которого сделаны электроды, и их положение, плотность энергии * на единицу объема и т. д.

---

* На это указывали ранее нас многие авторы (например, Раш, Брион, Габер и др.), но никто не высказался определенно, что тут более важно: $\frac{а}{\text{кв. см}}$, $\frac{в}{см}$ или же, наконец, $\frac{\text{квт}}{\text{куб. см}}$. Мы склоняемся к последнему выражению. Повидимому, то же думал и Раш (см. стр. 110).

Более или менее значительные отклонения от условий, соответствующих нормальному режиму данной печи, сильно влияют на ее работу вообще и в частности могут изменить размеры вольтовой дуги, расположение ее в камере печи, мощность и т. д., т. е. повлиять на производительность печи. В предельных случаях, например, при чрезмерно сильном продувании обрабатываемого воздуха, дуга может совершенно потухнуть.

5. Вследствие такой сложности явления результаты, получающиеся в данной печи, пока не изучен всесторонне процесс горения в ней воздуха, носят, кажется, произвольный характер. Сравнение диаграммы в различных проекциях позволяет их несколько координировать, но что касается нас лично, то мы были в состоянии обработать их численно, только составив излагаемое ниже представление о процессе.

В основание его положены следующие наблюдения и соображения. Опыт показывает, что в данной печи, при установившемся характере явлений в ней происходящих, процент окислов азота в выходящих газах повышается с замедлением тока воздуха. При малых скоростях воздуха, как, например, было в опытах Габера и Кёнига, процент окиси доходит до 9.8[11], а у Шейера в одном опыте даже до 12.9[17]. Обратно, повышение скорости воздуха понижает процент NO. Следовательно, приращения c и δ, в этих условиях обратного знака, или

$$\frac{dc}{d\delta} < 0.$$

Таким образом, δ можно рассматривать как некоторый фактор, вызывающий понижение процента NO по сравнению с тем, что мы имели бы, если бы работали в идеальных условиях. Эти идеальные условия были бы осуществлены, если бы мы могли уберечь окислы азота от распадения по выходе их из области вольтовой дуги и если бы обработанный дугою воздух не разжижался притоком воздуха, ею необработанного.*

В реальных условиях мы можем, правда, сделать $\delta = 0$, т. е. не возобновлять совершенно воздуха в печи; но и тогда благодаря присутствию холодной стенки устанавливается постоянная циркуляция его и некоторое охлаждение, имеющее результатом обязательное понижение процента NO в сравнении с тем, который имелся в области дуги. С распадом окислов азота по

* Мы рассматриваем все время, согласно господствующим воззрениям, процесс горения воздуха в вольтовой дуге как термический и не считаемся с возможностью его периодичности, каковая вытекает, повидимому, из опытов Шпиля[18].

выходе из вольтовой дуги можно бороться только так называемой закалкой газов, но эта борьба в существующих теперь печах очень далеко не сохраняет всех образовавшихся в дуге окислов.

Одним словом, все уклонения действительных печей от идеальных условий стремятся понизить процент NO, подобно дутью, и потому мы считаем, что эти дефекты могут быть изображены в виде некоторого эквивалентного им добавочного дутья, которое мы обозначаем α и которое по предыдущему должно принять налагающимся на дутье δ.

Допустив законность такого способа описания явлений, мы можем далее рассуждать так. Пусть печь работает при некотором определенном режиме: дутье равно $\delta + \alpha$ и процент NO равен c. Пусть теперь дутье получит некоторое приращение $d\delta$; оно будет сопровождаться некоторым приращением dc, противоположным по знаку $d\delta$. Вероятно, что dc по величине будет тем больше, чем больше уже имеющийся в печи процент NO и чем бо́льшую часть первоначального дутья $\delta + \alpha$ составляет его приращение $d\delta$. Принимая при этом в первом приближении прямую пропорциональность, получаем:

$$dc = -c \cdot \frac{d\delta}{\delta + \alpha},$$

или

$$dc = -\frac{c}{\delta + \alpha} d\delta.$$

Иначе говоря, мы исходим из положения, что определенному $d\delta$ соответствует тем больше dc, чем интенсивнее шло горение, с одной стороны, и чем меньше, с другой, было то дутье, на которое налагается прибавка $d\delta$, имеющая, конечно, лишь относительное значение по сравнению с $\delta + \alpha$.

Если предыдущее верно, то характеристичным дифференциальным уравнением горения воздуха в электрических печах должно быть выражение

$$\frac{dc}{d\delta} = -\frac{c}{\delta + \alpha}. \qquad (2)$$

В дальнейшем мы принимаем α постоянным и при интегрировании уравнения (2) получаем

$$\delta + \alpha = \frac{b}{c}, \qquad (3)$$

где b есть постоянная интегрирования. Так как левая часть уравнения $\delta + \alpha$ есть дутье, то его должна представлять и правая часть, т. е. частное $b : c$, откуда вытекает, что b должно иметь измерение граммов азотной кислоты на 1 квт-час [см. уравнение (1)]; о численном значении b см. стр. 109.

Уравнение (3) наглядно показывает, что для того, чтобы заставить установившийся в печи процент NO понизиться до половины, надо увеличить дутье более чем в 2 раза. Действительно, пусть c' равно $\frac{c}{2}$ и соответственное дутье равно δ', тогда

$$(\delta' + \alpha) : (\delta + \alpha) = \frac{2b}{c} : \frac{b}{c} = 2$$

$$\delta' = 2\delta + \alpha.$$

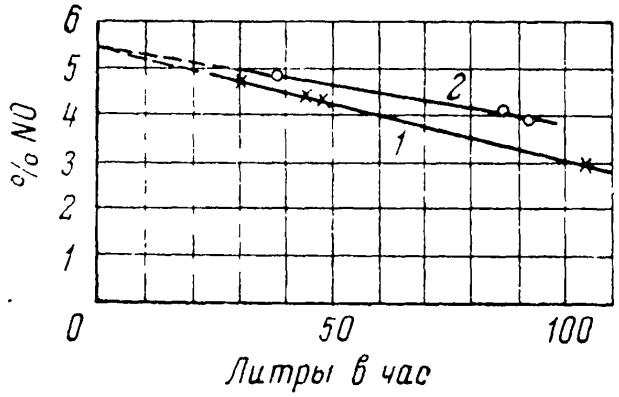


Рис. 3.

Это так и должно быть, потому что увеличение в этом случае дутья только вдвое отвечало бы мгновенному разбавлению воздуха в печах (с определенным процентом NO), равным объемом воздуха, совершенно несодержащего NO. На деле же при увеличении дутья вдуваемый воздух подвергается действию дуги, и, следовательно, в нем появляется некоторое добавочное количество окислов азота.

Заметим, что, несмотря на большую вероятность последнего обстоятельства, в литературе вопроса встречаются некоторые недоразумения. Так, например, в статье Грау и Русса [9] говорится: «Если из данных одного опыта, которые дают зависимость концентрации окислов азота при различных скоростях продувания воздуха, графически экстраполировать (разрядка наша, — *Г.* и *М.*) до нулевой скорости воздуха, то получается та концентрация окиси азота, которая должна бы отвечать равновесию в дуге. При этом оказывается, что кривые различного использования энергии *1* и *2*... стремятся к одной точке, а именно при воздухе к 5.5% NO...» (рис. 3).

Результаты, на основании которых построена диаграмма Грау и Русса, перепечатаны в трех первых столбцах табл. 1; два последних вычислены нами.

Грау и Русс не говорят определенно, что ими подразумевалось под скоростью воздуха, но рассмотрение рис. 3 приводит к

заключению, что они принимают прямолинейность δ с изменением процента NO или, иначе, что зависимость между ними должна быть вида $\delta = \operatorname{tg} \alpha$ (5.5 — %NO). Это ведет, однако, к следствию, что при содержании окиси азота ниже 3.66% падение ее процента должно идти быстрее нарастания дутья, а при более высоких процентах — наоборот медленнее. Такое следствие диаметрально противоположно положению, высказанному нами выше, и мы считаем его не отвечающим действительности.

Таблица 1

P	L/h	%NO	δ	G
		1-й ряд		
175	30.9	4.81	0.177	23.9
„	44.4	4.37	0.254	31.1
„	48.3	4.44	0.276	34.3
„	104.1	2.90	0.595	48.5
		2-й ряд		
190	38.7	4.81	0.204	27.6
206	87.6	4.13	0.425	49.5
201	92.0	3.93	0.458	50.6

Сопоставляя уравнение (3) с (1 bis) и исключая δ, мы получаем:

$$\frac{8}{225} G = b - ac. \qquad (4)$$

Словами это выражение значит следующее: $\frac{8}{225} G$ или число граммов HNO_3, вырабатываемых 1 квт в течение $\frac{8}{225}$ часа, т. е. в течение 128 сек., равно разности между максимальным числом граммов b, которое взятая печь в состоянии выработать за этот промежуток времени при данном режиме, и числом граммов ac, недовыработанных из-за дефектов печи.

Вынося в уравнении (4) a, мы получаем:

$$G = k'(b' - c), \qquad (4\text{ bis})$$

где $k' = \frac{225}{8} a$ и $b' = \frac{b}{a}$.

Итак, зависимость между G и c при определенном режиме печи выражается линейным уравнением, в котором k' есть тангенс угла, образуемого прямой, пересекающей ось c при $G=0$, когда b' дает максимальный процент окиси ($C_{max.}$), достижимый в идеальном случае неизменяемости ха-

рактера процесса при полном покое воздуха («равновесие дуги» по Грау и Руссу, Рашу, Бриону и др.). При $c=0$ эта прямая сечет ось G, тогда выражение

$$G_{max.} = k'b' = \frac{225}{8} b$$

дает максимальное число граммов азотной кислоты на 1 квт-час, которого, предполагается, можно бы достигнуть в течение 1 часа при тех же идеальных условиях неизменяемости характера процесса и бесконечно большом дутье.

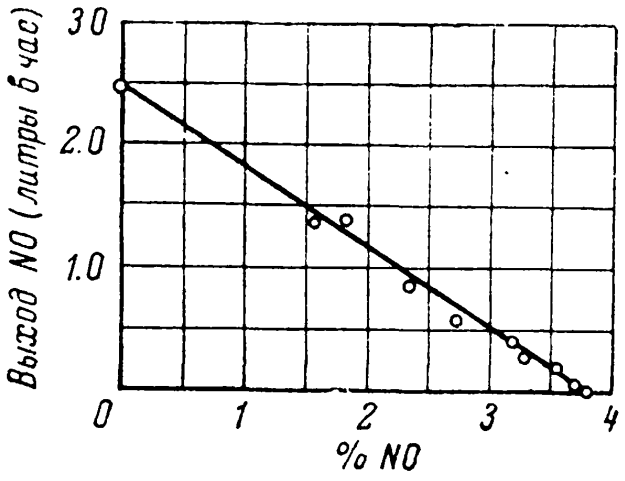


Рис. 4.

Словами выражение (4 bis) говорит, что возможны условия, когда при уменьшении процента NO в арифметической прогрессии выход азотной кислоты растет тоже в арифметической прогрессии.

Выражение

$$G = k'(b'-c),$$

не ново. Эквивалентное ему уравнение, в котором вместо G стоят лишь литры NO, отнесенные не к 1 квт-часу, а к некоторой постоянной мощности дуги, выведено Рашем [13] (рис. 4) для одной из серий опытов Ле Блан с Нираненом [4]. Но не мешает заметить, что так как Рашу не была известна зависимость между величинами, характеризующими и тангенс угла прямой и максимальные граммы ($k'b'$), то и сделанные им выводы не могут считаться вполне точными.

Так, он пишет: «Уравнение (прямой) наглядно показывает практическое затруднение, которое принципиально свойственно образованию окиси азота, и, точнее, всем поточным способам. Если мы желаем близко подойти к выходу А (выше это $\frac{225}{8} b$), то должны перейти к бóльшим v (объемам продуваемого в печь воздуха) и, следовательно, примириться с малыми концентрациями NO в конечных смесях... Так, например, если мы желаем достичь 95% максимального выхода, который растет с пространственной плотностью энергии в очаге реакции (см. сноску* на стр. 105), то из уравнения вычисляется, что концентрация NO

будет лишь 0.2%.* В общем эти замечания правильны, но ясно на основании предыдущего и то, что можно поднять выход в достаточной для практики степени, заботясь об увеличении b и уменьшении α.

Необходимо добавить, что Рашем одновременно выведен и частный случай уравнения

$$\delta + \alpha = \frac{b}{c}$$

в виде уравнения

$$\frac{1}{x_0} + \frac{v}{A} = \frac{1}{x},$$

где $x = \frac{c}{100}$ $\left(\text{по Рашу} — \frac{p}{100}\right)$, x_0 — концентрация окиси азота при покое воздуха, т. е. $\frac{b'}{100}$, v — ток воздуха в литрах в 1 час (при постоянной мощности дуги) и, наконец, A — постоянная, характеризующая, по Рашу, использование энергии, т. е. величина, пропорциональная максимальному количеству окиси азота, которое могло бы получиться в печи при бесконечно большом дутье.

Оба выражения $\left(\alpha + \delta = \frac{b}{c}\right.$ и $\left.\frac{1}{x_0} + \frac{v}{A} = \frac{1}{x}\right)$ совпадают, если приравнять hP к A, что возможно в каждом частном случае, т. е. для данной печи при постоянстве h (длительности опыта в часах) и P (мощности дуги).

Соображения, приведшие Раша к его уравнению, им и не даны**; не сделано попытки выяснить значение постоянной, и приложено оно только к одной серии опытов Ле Блана с Нираением. Вероятно, этим объясняется, что до сих пор оно не обратило на себя внимания*** и не упоминается в журнальной и диссертационной литературе. Нам кажется, что в технической

---

* Не лишне отметить еще раз, что коэффициенты уравнения выведены на основании случайно выбранных данных Ле Блана.

** «Я нашел, — пишет он [16], — что влияние скорости течения воздуха на концентрацию окиси азота выражается уравнением $\frac{1}{x} = \frac{1}{x_0} + \frac{v}{A}$».

*** Мы поняли его значение, только выведя уравнение $\delta + \alpha = \frac{b}{C}$.

области за работой Раша должно быть признано первенствующее значение.

Наконец, элиминируя из уравнений (3) и (1bis) c, мы приходим к выражению

$$\frac{8}{225} G = \frac{\delta b}{\delta + a} \text{ или } G = \frac{k'b'\delta}{\delta + a} = \frac{G_{max.}\delta}{\delta + a}, \text{ или}$$

$$\delta = \frac{G\alpha}{G_{max.} - G}, \tag{5}$$

дающему зависимость между объемом продуваемого в печь воздуха и граммами образующейся на каждый квт-час азотной кислоты. Стодвадцативосьмисекундный выход последней, образующийся в данной печи на каждый киловатт в дуге, при некотором постоянном режиме, равен, как видно, максимальному числу граммов b, которое способна печь при этом выработать, умноженному на дробь $\frac{\delta}{\delta + \alpha}$, которая характеризует большее или меньшее совершенство печи. Тот же смысл имеет, очевидно, и выражение для часового выхода азотной кислоты.

Возможность указанной зависимости (5) в литературе вопроса до сих пор, повидимому, не упоминалась, и мы считаем, что она дается нами впервые.

6. Переходя к сравнению наших теоретических соотношений с нашими же опытными данными, мы считаем не лишним предпослать краткое описание того способа наблюдения, которого мы держались. В общем он, понятно, совпадает с методами, употреблявшимися другими исследователями в этой области, и если отличается от них, то разве только упрощениями, доведенными почти до предела.

Воздух, продувавшийся через печи, измерялся (с необходимыми поправками) при малых печах по выходе из них микроманометром Крёля, градуированным с помощью нормальных газовых часов, а при печах большой мощности непосредственно большими газовыми часами перед поступлением в печь. Затем из обработанных дугою газов бралась от времени до времени проба таким образом, что мы заставляли газы проходить или полностью, или же частично через сухую стеклянную бутыль определенной емкости в течение времени, достаточного для вытеснения бывшего в ней воздуха, причем отмечались, понятно, температура газов и барометрическое давление. Потом бутыль отделялась от газопровода, в нее наливалось опреде-

ленное количество крепкой серной кислоты, и полученная нитроза анализировалась на другой день с помощью нитрометра Лунге тоже с соблюдением необходимых предосторожностей. Обыкновенно бралось две таких пробы: одна непосредственно за другой. Электрические измерения заключались в определении мощности, поглощаемой дугою, при помощи соответствующего ваттметра.

Результаты опыта вычислялись так: анализ нитрозы устанавливал, при известной емкости бутыли, объемный процент окиси азота; часы или микроманометр давали часовой объем (при 0°С и 760 мм рт. ст.) воздуха, проходившего через них в момент забора газов; ваттметр давал мощность дуги, относившуюся к тому же моменту; полученные цифры оставалось вставить в выражение $G = \frac{225}{8} c\delta$.

Несомненно, что метод заключает несколько источников ошибок, но, насколько мы можем видеть, все эти ошибки одного знака: они стремятся понизить результаты опыта и позволяют потому относиться с некоторым доверием к добытым цифрам и предполагать, что они свободны от тех преувеличений, которые, как известно из литературы предмета, бывали иногда очень значительными. Мы предпочли этот метод длительному поглощению образуемых в печи окислов азота с отсчетом израсходованной электрической энергии по счетчику еще и потому, что считались с гибкостью способа и возможностью быстрого варьирования условий опытов. Последнее было для нас тем более ценно, что, занятые другими обязанностями, мы могли посвящать опытам очень ограниченное время (главным образом воскресные и другие праздничные дни).

Мы не описываем конструкции печей, с которыми работали, так как эта сторона вопроса лежит совершенно вне рамок настоящей статьи. Схема нашей печи дана в труде проф. Сапожникова [2].

Наконец, еще замечание по поводу анализируемого ниже материала. Поневоле пришлось ограничиться почти исключительно рассмотрением собранных нами цифр, так как нам не удалось найти сколько-нибудь систематических исследований других авторов. Причина этого лежит, вероятно, в патентных соображениях и до известной степени понятна. Мы отмечаем этот недостаток, чтобы объяснить, почему мы сочли возможным привлечь к обработке и данные Кёнига и Хольвеха [10], хотя авторы и считают их неоднородными и малосравнимыми между

собою: они были единственными, полученными более систематично.

Данные для малой модели печи Биркеланда — Эйде (сравнить [2], стр. 54) передаются тремя диаграммами. Первая (рис. 5) дает зависимость между G и c, и на ней нанесены в виде косых пунктирных линий проекции равных δ. При рассмотрении как этой, так и всех последующих диаграмм необходимо всегда иметь в виду, что начало координат лежит влево и значительно ниже. Диаграмма вторая (рис. 6) дает соотношение δ—c, а третья (рис. 7) δ—G, линии равных процентов нанесены на ней пунктиром в виде косых, которые сходятся в начале координат.

Метод, которого мы держались при построении диаграмм, был следующий: мы наносили на них все опытные данные и исключали только заведомо малодостоверные цифры. Так, например, для модели печи Биркеланда—Эйде нами были исключены лишь 20 точек первого дня наблюдений, когда мы учились обращению с печью и выясняли наиболее удобные способы забора газов и анализа их; все остальные данные, которые могли уместиться на диаграмме, нанесены затем без пропуска.

После сверки диаграмм в трех проекциях мы искали, опираясь, по преимуществу, на диаграммы G—c и δ—c, те пограничные линии, которые заключали бы между собою по возможности все опытные точки правой части диаграммы (о левой см. ниже). Помогало при этом то, что данные конвергируют, как отмечено уже Грау и Руссом, Рашем, Брионом, к некоторому максимальному проценту NO (ср. ниже). Предыдущие исследователи считали его характерным для температуры вольтовой дуги вообще, мы же предполагаем, что действительные проценты NO в дуге, или, точнее, в той области, где происходит горение воздуха, могут лежать значительно выше. Конвергирование опытных точек сказывается в том, что прямые, ограничивающие опытные точки на диаграмме G—c, идя слева направо и сверху вниз, постепенно сходятся. Когда точка их конвергирования была найдена, то дальнейшее не представляло затруднений. Сравнением диаграмм G—c и δ—c легко было установить, через какие опытные точки на первой диаграмме следовало вести прямые, а отсюда можно было вычислить k' уравнения

$$G = k' (b' - c).$$

Таким образом, на первой диаграмме были найдены прямые с уравнениями $G = 17.14(3.619 - \%)$ и $21.8(3.619 - \%)$. От-

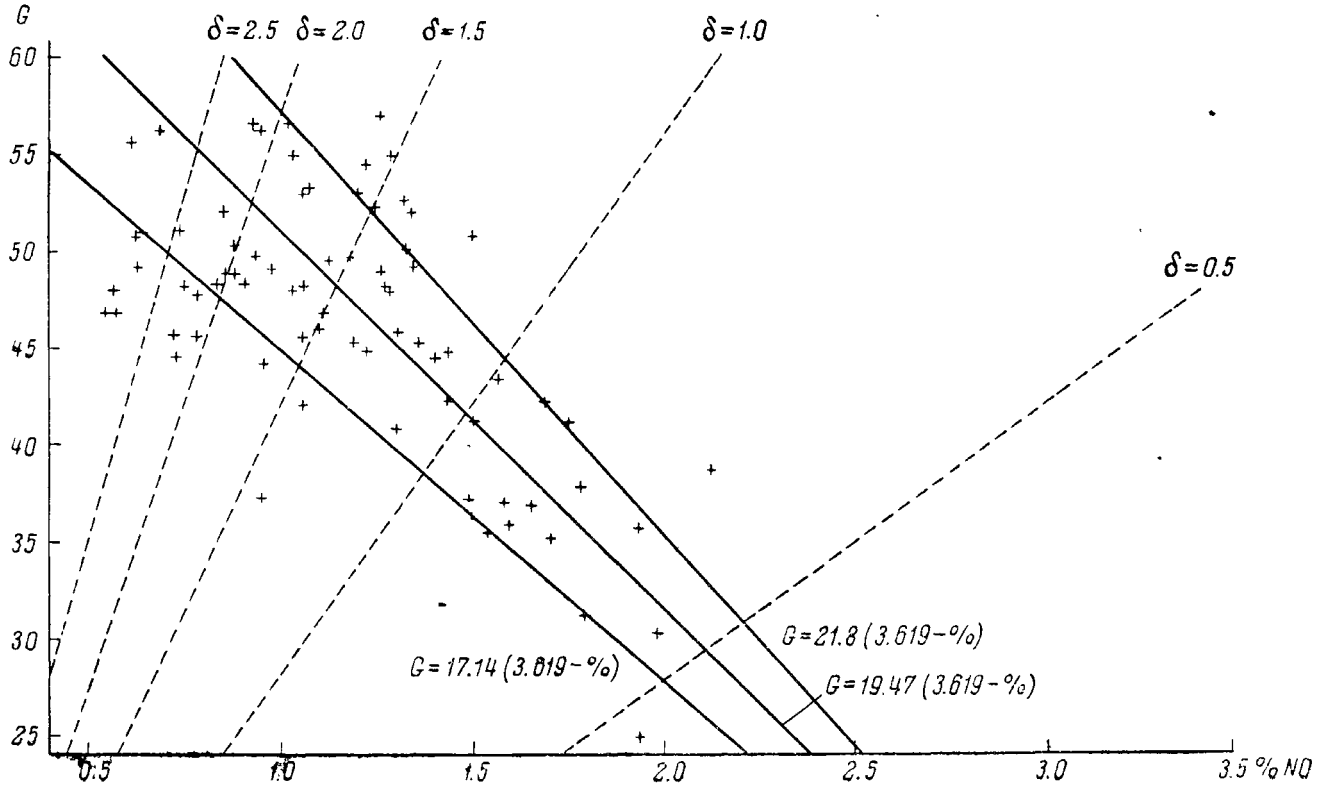

G
δ=2.5
δ=2.0
δ=1.5
δ=1.0
δ=0.5
60
55
50
45
40
35
30
25
G=21.8 (3.619-%)
G=19.47 (3.619-%)
G=17.14 (3.619-%)
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5 % NO

Рис. 5.

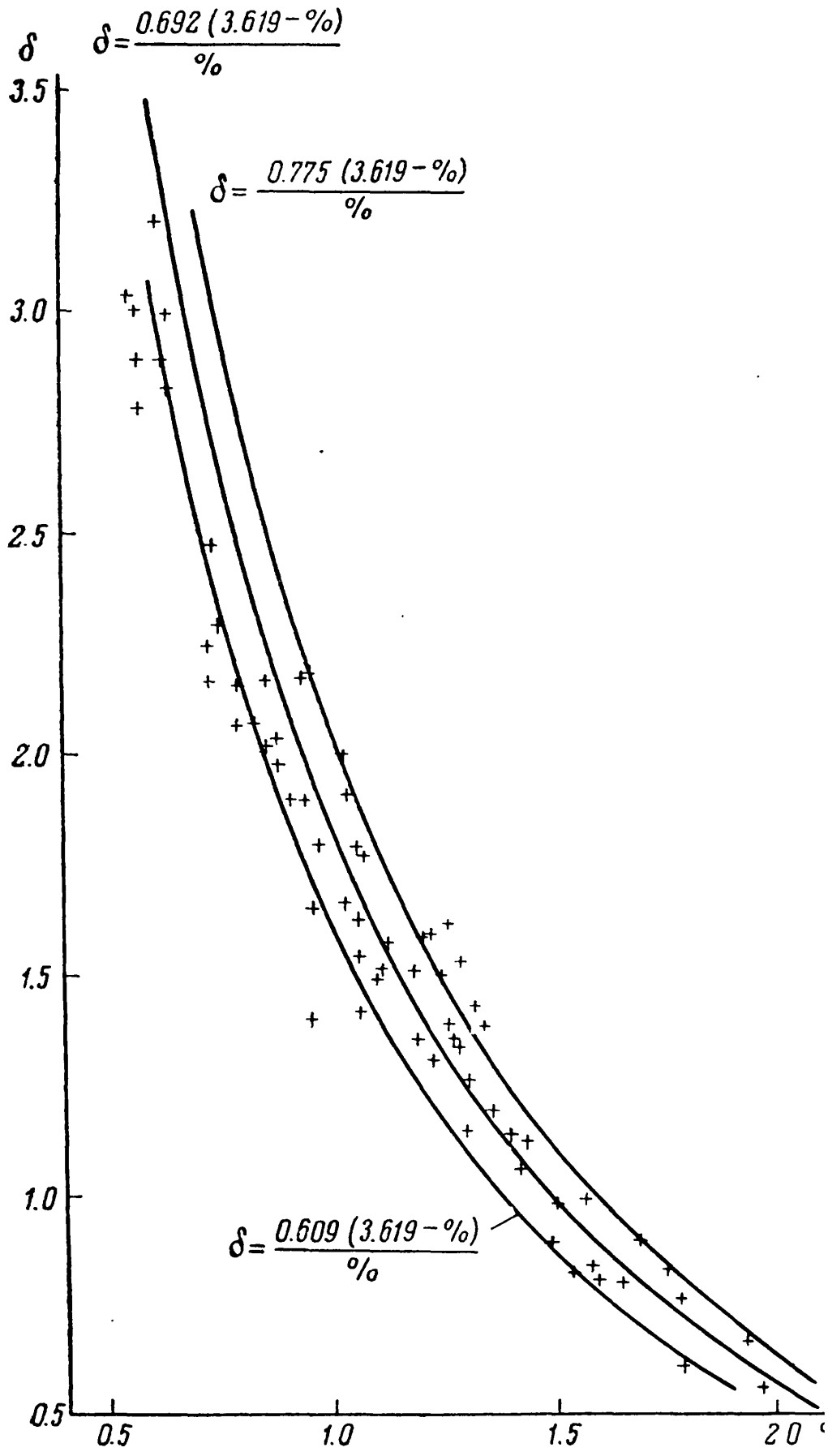

δ
δ = 0.692 (3.619 − %) / %
δ = 0.775 (3.619 − %) / %
δ = 0.609 (3.619 − %) / %
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.5
1.0
1.5
2.0

Рис. 6.

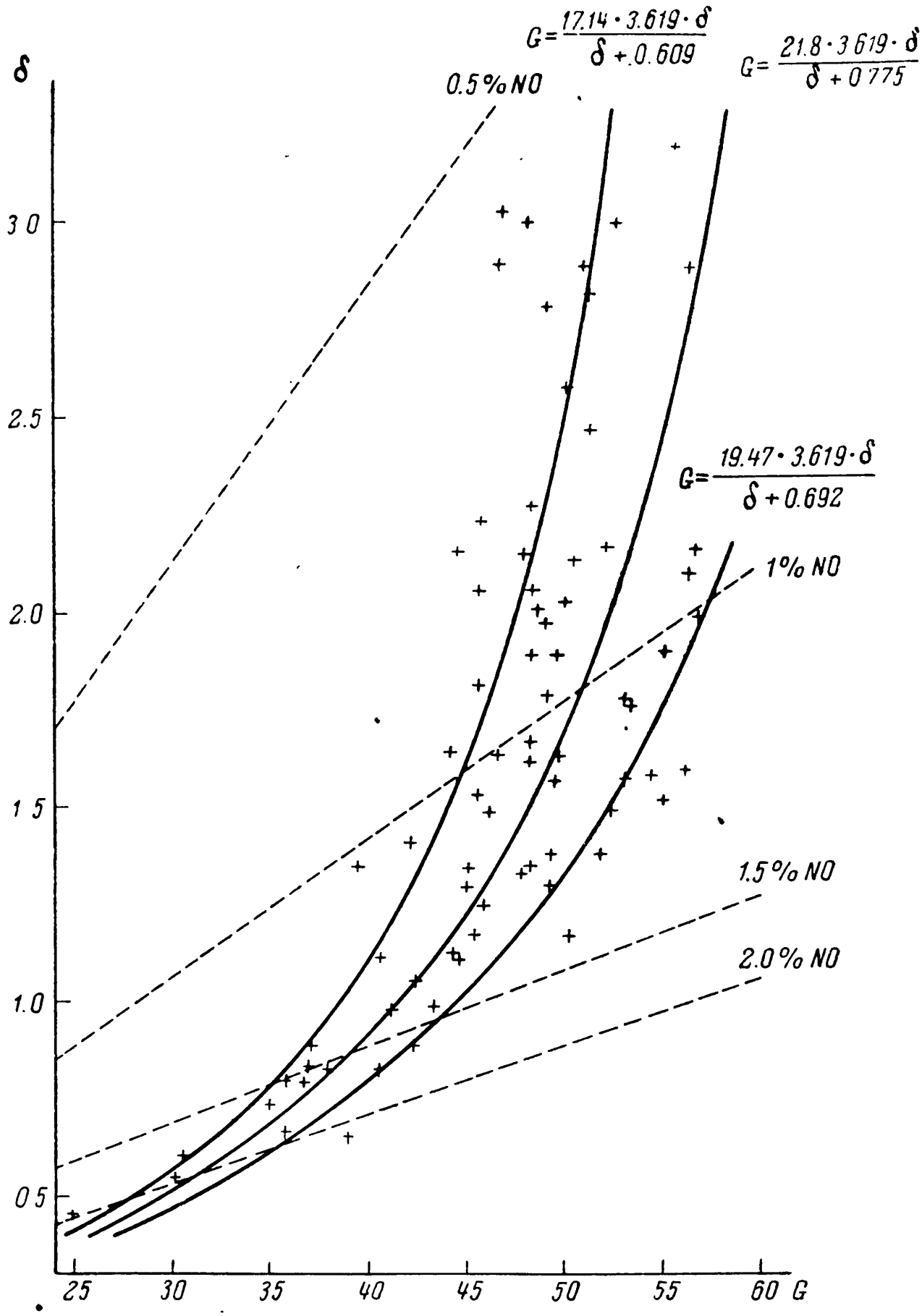

δ
$G=\frac{17.14\cdot 3.619\cdot\delta}{\delta+0.609}$
$G=\frac{21.8\cdot 3.619\cdot\delta}{\delta+0.775}$
0.5% NO
$G=\frac{19.47\cdot 3.619\cdot\delta}{\delta+0.692}$
1% NO
1.5% NO
2.0% NO
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
25
30
35
40
45
50
55
60
G

Рис. 7.

сюда же вычислялись α $\left(k' = \frac{225}{8}\alpha\right)$ и b $\left(\frac{b}{\alpha} = b'\right)$, и получалась, следовательно, возможность нанести отвечающие этим прямым гиперболы диаграмм δ—c и δ—G. Само собою понятно, что такие гиперболы проходили через данные тех же опытов, через которые шли прямые на диаграмме G—c, и что они точно так же резко ограничивали область огромного большинства опытных точек от остальной площади диаграммы.

Что касается средней прямой с уравнением $G = 19.47\ (3.619—\%)$, то ее тангенс есть среднее арифметическое между тангенсами обеих крайних прямых. Ей отвечают средние гиперболы на диаграммах δ—c и δ—G.

Рассмотрение диаграммы приводит нас к следующим заключениям.

а) Опытные точки для данной печи не укладываются на одной прямой, или на одной гиперболе, как можно было бы заключить на основании предыдущей теории. Отчасти это объясняется довольно значительными ошибками опытов; но затем влияет и то, что при сложности условий, влияющих на дугу (ср. стр. 106) далеко не сразу удается овладеть условиями ее наиболее благоприятного горения; печь тогда работает не при одном и том же α, а при различных значениях его и можно даже утверждать, что каждому α отвечает «своя печь» со своим положением электродов, способами подведения воздуха, скоростью его продувания и т. д. Поэтому ниже мы характеризуем печь пределами, в которых, по нашим наблюдениям для них, колебались α, а также и b, так как к нему относится и все сказанное про α.

б) Чем выше концентрация окислов азота, тем у́же область устойчивости дуги; эта область расширяется с падением процента NO. Это непосредственно вытекает из нашего основного положения. Этим обстоятельством объясняется и то, что для каждой печи можно выискать точку на оси процентов, к которой к а к б ы конвергируют опытные данные. Мы подчеркиваем слова «как бы», потому что не имеем наблюдений, которые показали бы, что точка, к которой конвергируют данные, достижима в действительности.

в) Повышением дутья удается поднять выход HNO_3 на 1 квт-час и тем добиться лучшего использования энергии, но это повышение ограничено условиями устойчивости дуги, и при переходе через них дуга начинает срываться и во всяком случае наблюдается относительное понижение использования энергии. Этот срыв был уже отмечен Брионом, как такой, который

определяет максимум достижимого в данной печи выхода NO. В опытах с нашей моделью печи Биркеланда—Эйде он оказался около 1.1% NO.

г) Так как все прямые для δ (на диаграммах G—c) сходятся в начале координат, а, с другой стороны, опыты всегда приходится вести в известных пределах δ, то ясно, что опытные точки, получаемые при срыве, точно также располагаются (на диаграмме G—c в ее левой части) между двумя сходящимися прямыми, идущими слева направо и сверху вниз. И в этой части диаграммы мы встречаемся, следовательно, с сужением условий устойчивости дуги.

д) На диаграмме δ—c срыв дуги сказывается в отклонении опытных точек, начиная с известной величины δ (около 1.6 для данной печи) к оси δ, ведущем к излому гиперболических линий, на которых опытные точки располагались ранее и которые отвечали уравнению

$$\delta = \frac{\alpha(b'-c)}{c} \qquad (3bis)$$

е) На диаграмме δ—G опытные точки распределяются веерообразно: они сжаты при больших процентах NO, малых δ и малых граммах. Срыв характеризуется отклонением точек к оси δ.

Теми же особенностями отличаются и результаты опытов с другими печами, почему перечисленные выводы обладают характером общности.

Приведенная табл. 2, численно характеризующая построенную нами модель печи Биркеланда—Эйде, после сказанного не требует особых пояснений.

Сравнить непосредственно эти цифры с данными Биркеланда и Эйде нет возможности, потому что в литературе не имеется систематического отчета об их результатах. Приходится потому ограничиться несколькими отрывочными и, может быть, недостаточно достоверными справками.

По Броде[6], с печами в 7—10 квт Биркеланд и Эйде имели 400 кг HNO_3 на 1 квт-год,* что отвечает 45.66 г HNO_3 на 1 квт-час. Концентрация окиси азота при этом выходе не указана. В статье, напечатанной в 1905 г. в „Norsk tidsskrift for haandvoerk og industri“, Биркеланд и Эйде говорят, что в 1 литре воздуха, выходившем из их малых печей, имелось от 10 до 15 мг NO, что отвечает 0.747—1.12 (в среднем 0.933) объем-

* 1 квт-год = 8760 квт-час.

Таблица 2

	$c_{max.} = b'$	$G_{max.} = b'k'$	b	a
Пределы . .	3.619	62.0—78.8	2.20—2.81	0.61—0.776
Среднее . .	—	70.4	2.51	0.692

	% NO при срыве	δ срыва	G при срыве	% использования энергии, равный $\frac{G}{25.2}$	Отношение G при срыве к среднему $G_{max.}$
Пределы .	—	—	43.2—55.0	1.71—2.18	0.615—0 78
Среднее . .	1,1	1.587	49.1	1.94	0.697

ного % NO.* А так как повышение мощности энергии в единице объема повышает выход HNO_3, то возможно, что наши средние числа вполне совпадают с наблюдениями Биркеланда

Таблица 3

c . .	1.04	1.11	1.37	1.59	1.88	2.15
G . .	56.0	55.8	57.6	49.0	37.5	30.3

и Эйде. Как видно, δ должно было варьировать в их опытах между 1.45 и 2.17 и в среднем было равно 1.81; процент использования энергии был тоже равен 1.81.

Таблица 3bis

c	G		δ	
	опт.	выч.	опт.	выч.
1.37	57.6	57.54	1.495	1.495
1.59	49.0	49.77	1.095	1.110
1.88	37.5	39.54	0.710	0.748
2.15	30.3	30.01	0.510	0.498

Интересно сопоставить эти результаты с исследованием печи Мосцицкого** в 4 квт, опубликованным Брионом. Мы резюмируем их табл. 3, из которой видно, что, начиная с 1.37% NO, данные могут быть переданы уравнением

$$G = 35.5(3{:}0 - c),$$

* 30 дмг NO (или 63 дмг HNO_3) занимают при нормальных условиях (0°C и 760 мм) 2.24 см³. Объемный процент NO равен, следовательно, $\frac{2.24a}{300}$, если a — число децимиллиграммов NO в 1 литре воздуха, и $\frac{2.24b}{630}$, если b — число децимиллиграммов HNO_3 тоже в 1 литре воздуха.

** В печах Мосцицкого вольтова дуга вращается под влиянием магнитного поля между двумя концентрическими проводниками. Воздух продувается нормально к плоскости вращения дуги. Внешний вид дуги изображен у Ценнека [20].

которое, при опытных процентах NO, приводит к табл. 3bis.

Мы считаем согласие с уравнением достаточным и даем в табл. 4 численную характеристику модели печи Мосцицкого, построенной Брионом.

Таблица 4

$c_{max.} = b'$	$b'k' = G_{max.}$	b	α	% NO при срыве	δ срыва	G срыва	% использования энергии при срыве	Отношение G при срыве к $G_{max.}$
3.0	105.9	3.765	1.255	1.24	1.78	62.2	2.47	0.588

Данные столбцов 5, 6, 7 и 9 вычислены на основании предположения, что процент NO при срыве равен 1.24, каковое число есть среднее арифметическое между данными столбцов 2 и 3 для c в табл. 3.

Таблица 5

	$c_{max.} = b'$	$b'k' = G_{max.}$	b	α
Пределы .	6.87	66.2—77.8	2.345—2.755	0 342—0.402
Среднее . .	—	72.0	2.55	0.372

	% NO при срыве	δ при срыве	G при срыве	% использования энергии при срыве	Отношение G при срыве к среднему $G_{max.}$
Пределы .	—	0.96—1.13	48.7—57.3	1.93—2.27	1.677—0.797
Среднее . .	1.8	1.05	53.0	2.1	0.737

Для современных больших печей Биркеланда и Эйде, мощностью в 500—1000 квт и более, данные необыкновенно скудны. Ф. Ги[7] указывает, что в Нотоддене 3 печи по 500 квт каждая, вырабатывали в час по 3.3 кг HNO_3 на каждый куб. метр поглотительных башен. Объем последних дан в 400 м³ и, сле-

довательно, на 1 квт-час печи вырабатывали 36.66 г HNO_3.* Процент окиси азота в выходящих из печей газах не дан. Затем, по сообщению д-ра Ебсена одному из нас, газы из больших печей выходят с содержанием 0.035 г HNO_3 в 1 литре, и 1 квт-год дает 590 кг HNO_3, а это значит, что для них $c = 1.246$, $\delta = 1.92$, $G = 67.35$ и процент использования энергии равен 2.67.

Цифры эти не особенно расходятся с данными табл. 4, но возможно, что завод ушел уже вперед. Дело в том, что Биркеландом сообщено и более высокое данное. А именно, в 1905 г. в докладе Фарадеевскому обществу в Лондоне[3] он сослался на один опыт с печью в 300 квт, которая при продувании в нее в 1 мин. 12.5 м³ воздуха, вырабатывала в 1 мин. 179 г NO. В этом случае имелось, следовательно, $c = 1.07$, $\delta = 2.5$, $G = 75.2$ и процент использования энергии равен 2.99.

Почему этот режим не был сразу применен при больших печах — неизвестно.

Сопоставляя эти данные, мы, вместе с Брионом, предполагаем, что заводы Биркеланда—Эйде работают вблизи срыва дуги, и заключаем, что цифра $c = 1.24$ является чуть ли не наиболее характерной для дуги, раздуваемой магнитным полем, так как, несмотря на разнообразные конструкции, размеры и мощности печей, она сохраняет, как видно, свою величину. А именно, у нас с печью в 8—15 квт она близка к 1.1, у Бриона с печью в 4 квт и, вероятно, на заводе в Нотоддене с печами в 1500 квт она не выше 1.24.

Подводя итог сказанному, мы думаем, что печи Биркеланда—Эйде характеризуются сравнительно невысокой величиной b' ($c_{max.}$), но зато процесс в них устойчив и срыв дуги не начинается раньше 1.24%NO; это позволяет работать на больших δ; процент использования энергии в печи едва ли больше 2.7.

Данные для печей Горбова—Миткевича. После детального разбора результатов для модели печи Биркеланда—Эйде мы можем быть краткими при рассмотрении опытов с нашими печами, потому что по существу оба ряда данных повторяют друг друга. Схема всех печей была одна и та же;

* По Витту [19], поглощается башнями завода около 95% окислов и потому действительное количество азотной кислоты, вырабатываемой печами, несколько больше 3.3 кг; но, с другой стороны, и действительный объем башен, содержащих по всей вероятности плитки Лунге—Рормана, тоже процентов на 5 ниже их полного объема. Обе поправки компенсируют друг друга.

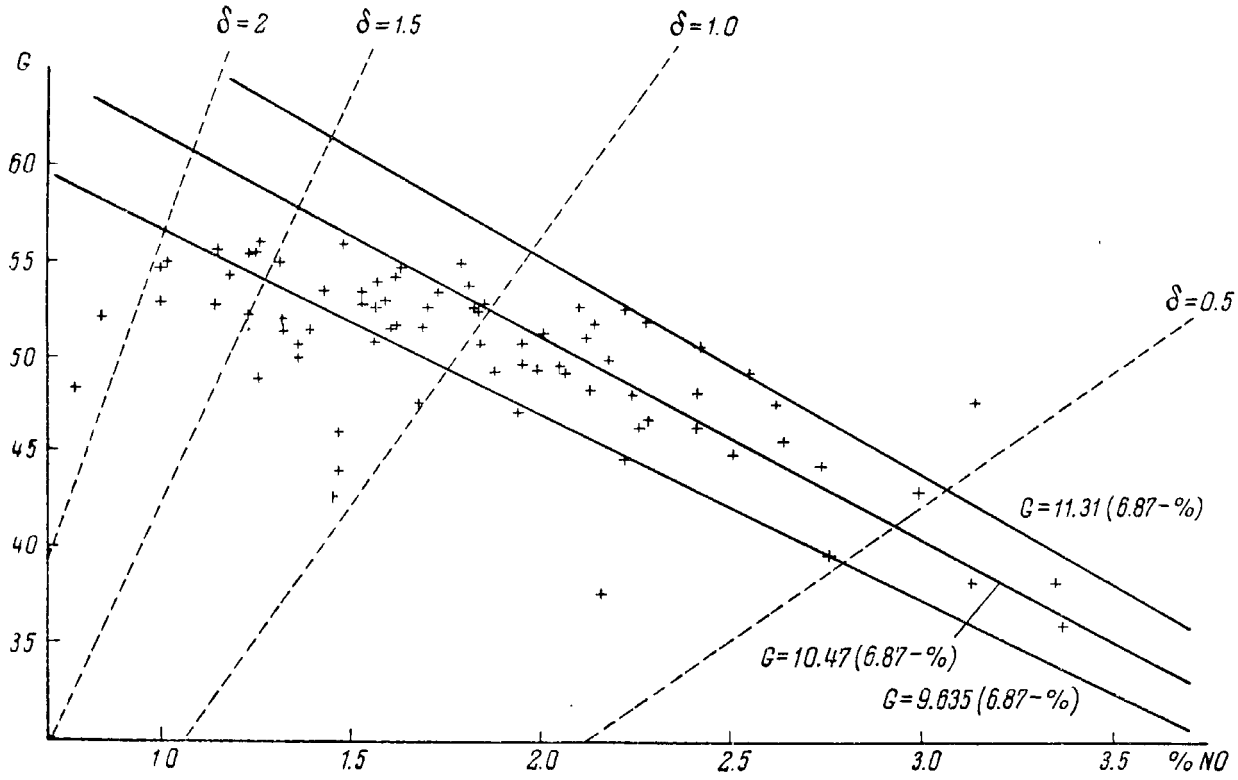

δ = 2
δ = 1.5
δ = 1.0
δ = 0.5
G
60
55
50
45
40
35
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
% NO
G = 11.31 (6.87 − %)
G = 10.47 (6.87 − %)
G = 9.635 (6.87 − %)

Рис. 8.

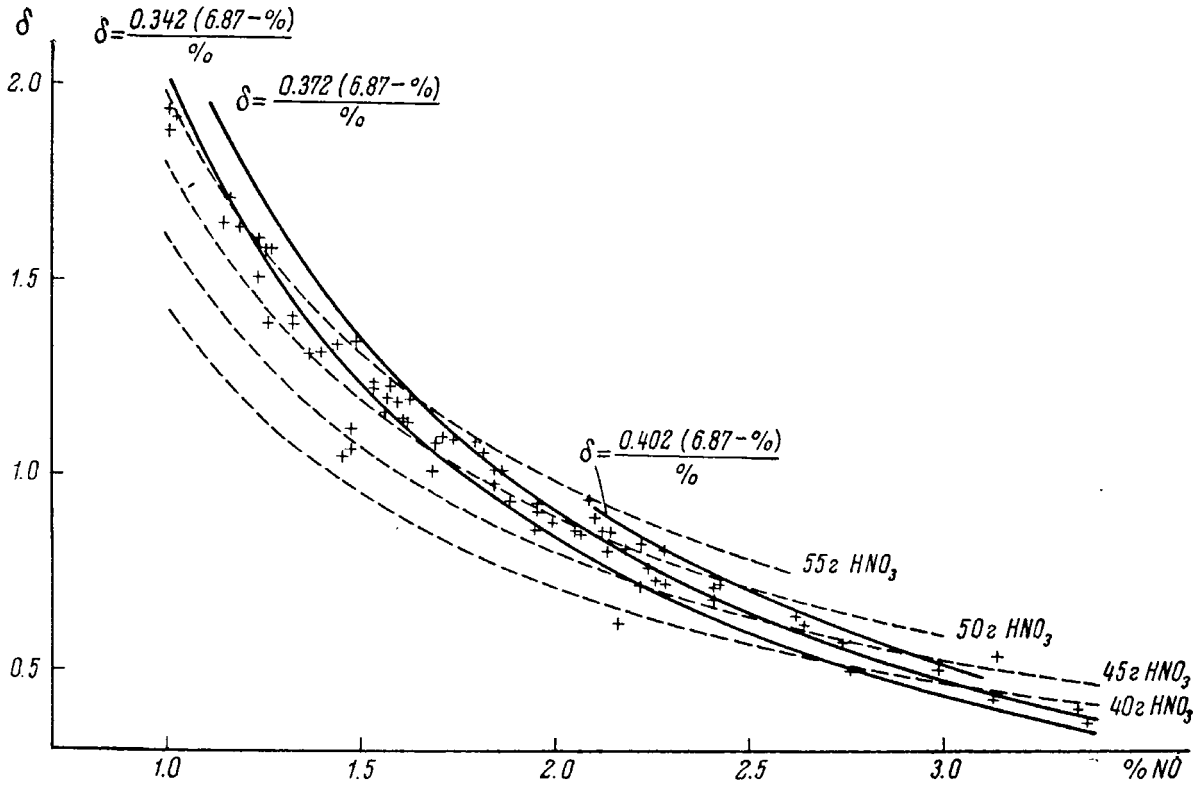

δ
δ=0.342 (6.87−%)/%
δ=0.372 (6.87−%)/%
δ=0.402 (6.87−%)/%
55г HNO3
50г HNO3
45г HNO3
40г HNO3
2.0
1.5
1.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
% NO

Рис. 9.

различие заключалось в расположении электродов, способе подведения воздуха и той или иной степени закалки продуктов горения, зависевшей от конструкции холодильника и камеры, в которой горел воздух. Печи №№ 1 и 2 работали на однофаз-

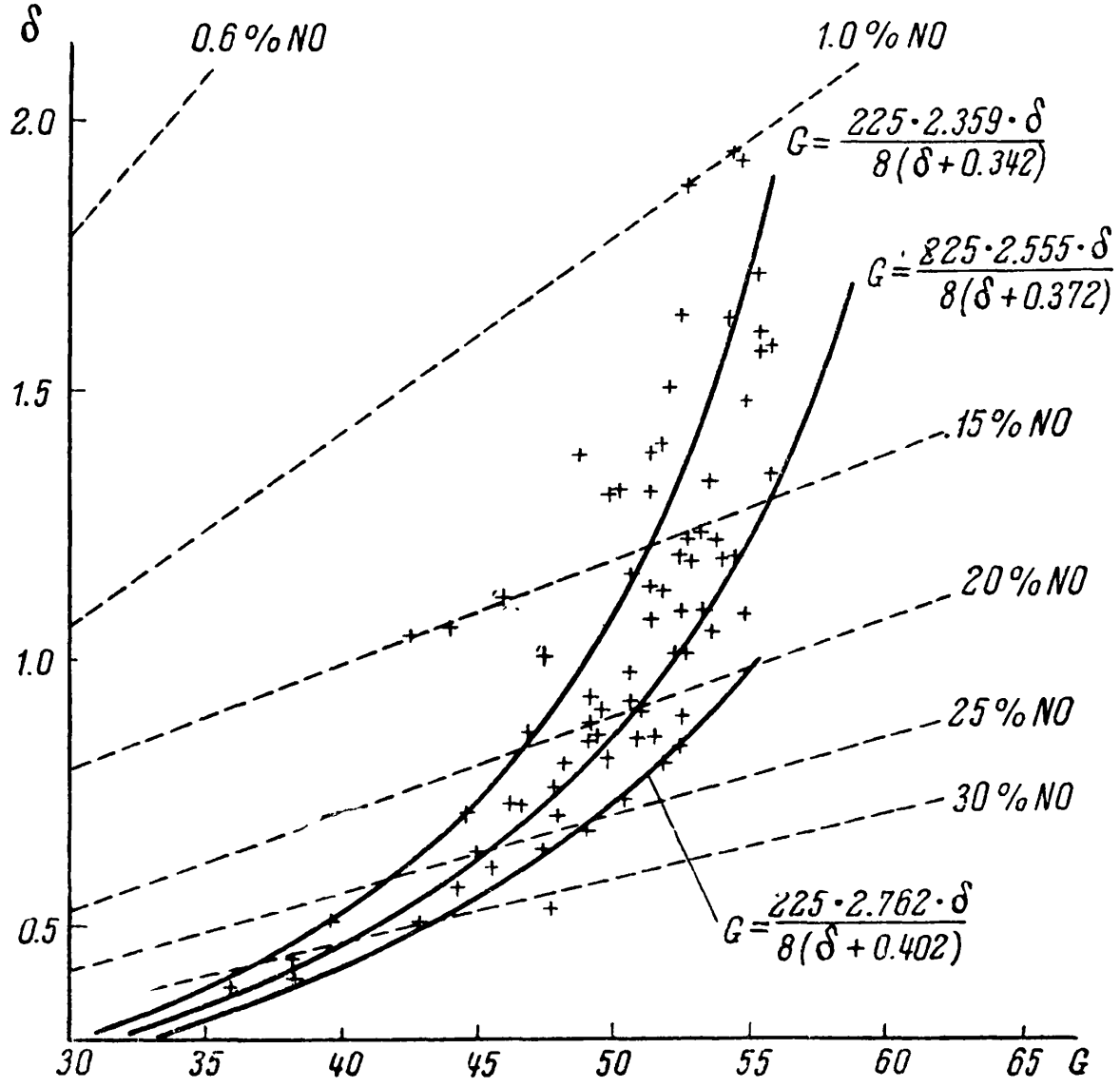


Рис. 10.

ном, а 3—8 на трехфазном токе; мощность дуги в печах №№ 1—7 колебалась между 10—30 квт, а в печи № 8 между 60—220 квт. При построении диаграмм нами попрежнему исключены лишь заведомо недостоверные цифры; так, например, для печи № 8 исключены только 23 опытные точки, считая и те, которые не уместились благодаря выбранным пределам концентрации NO и величины δ. Данные для печей 2—5 мы опускаем совершенно.

Для печи № 1 нами даются три диаграммы: рис. 8 (G—c), рис. 9 (δ—c) и рис. 10 (δ—G). Их результаты выражаются табл. 5.

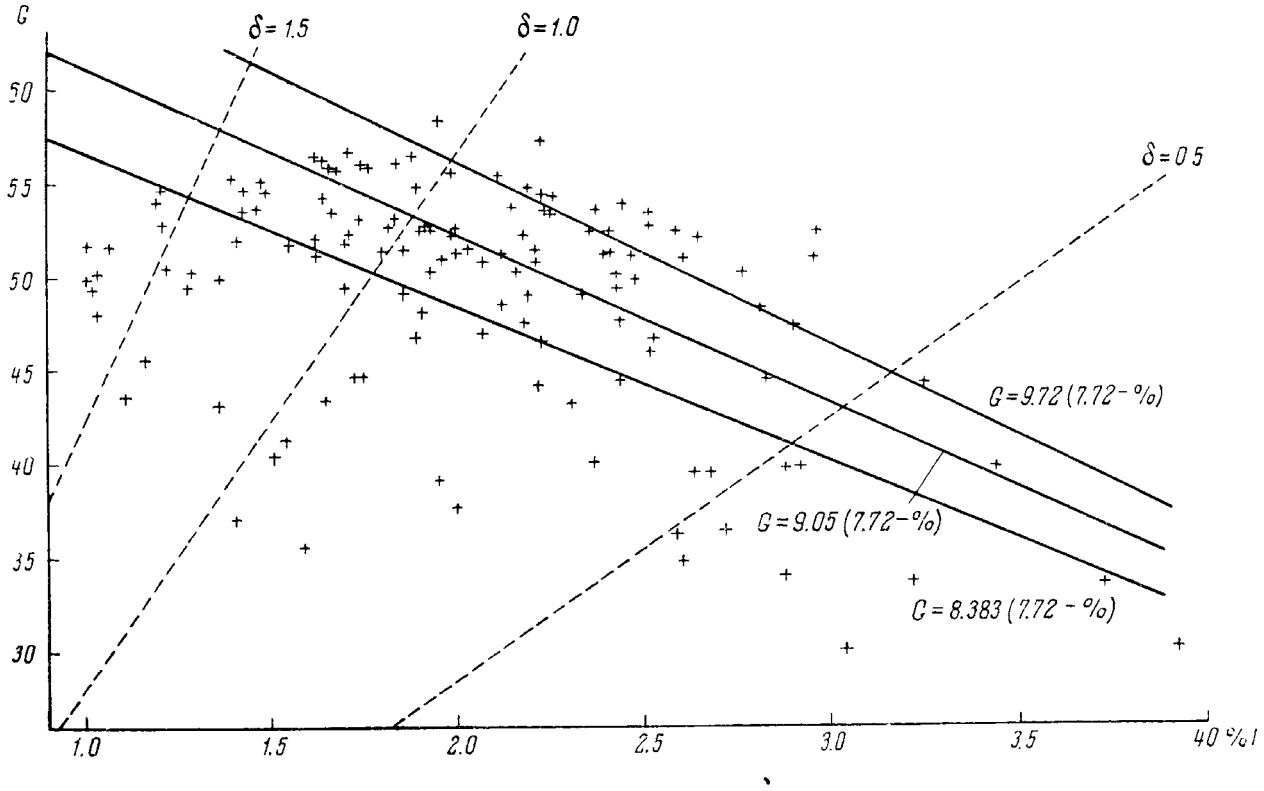

G
δ = 1.5
δ = 1.0
δ = 0.5
60
55
50
45
40
35
30
G = 9.72 (7.72 - %)
G = 9.05 (7.72 - %)
G = 8.383 (7.72 - %)
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
40 %

Рис. 11.

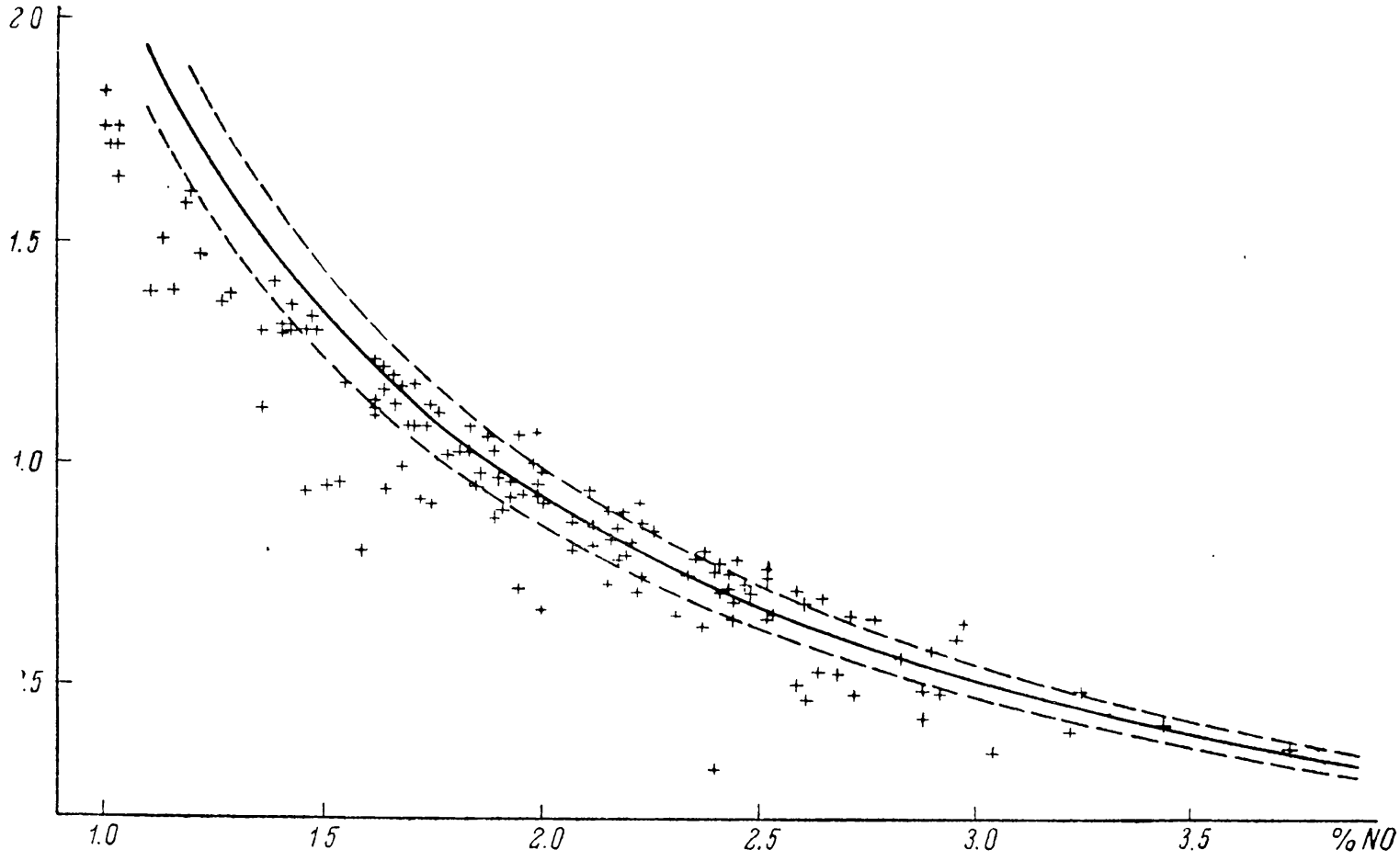


Рис. 12.

Для печи № 6 даны две диаграммы: рис. 11 (G—c) и рис. 12 (δ—c). Результаты отличаются значительной беспорядочностью, и мы ограничились потому на табл. 6 лишь четырьмя первыми столбцами.

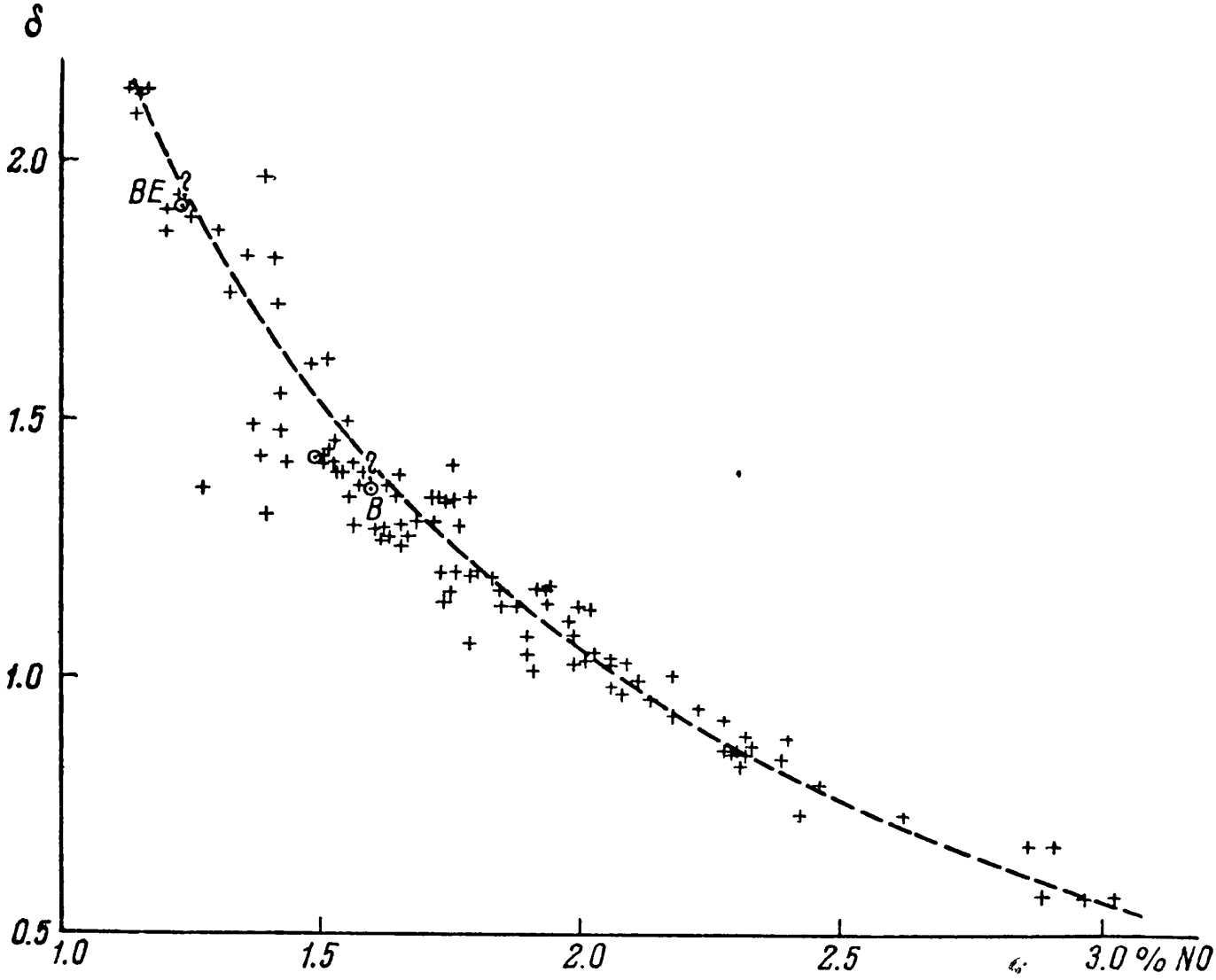


Рис. 13.

Таблица 6

	$c_{max.} = b'$	$b'k' = G_{max.}$	b	a
Пределы . . .	7.72	64.7—75.0	2.3—2.66	0.298—0.345
Среднее . . .	—	69.85	2.48	0.322

Для печи № 7 даны тоже две диаграммы: рис. 13 (δ—c) и рис. 14 (G—c). На диаграмме рис. 14 нанесены все полученные для печи данные. Кроме трех сплошных линий, на ней намечена пунктиром еще четвертая, идущая слева направо и сверху вниз, которая отвечает пунктирной же гиперболе на

диаграмме рис. 13. Численная характеристика передается табл. 7.

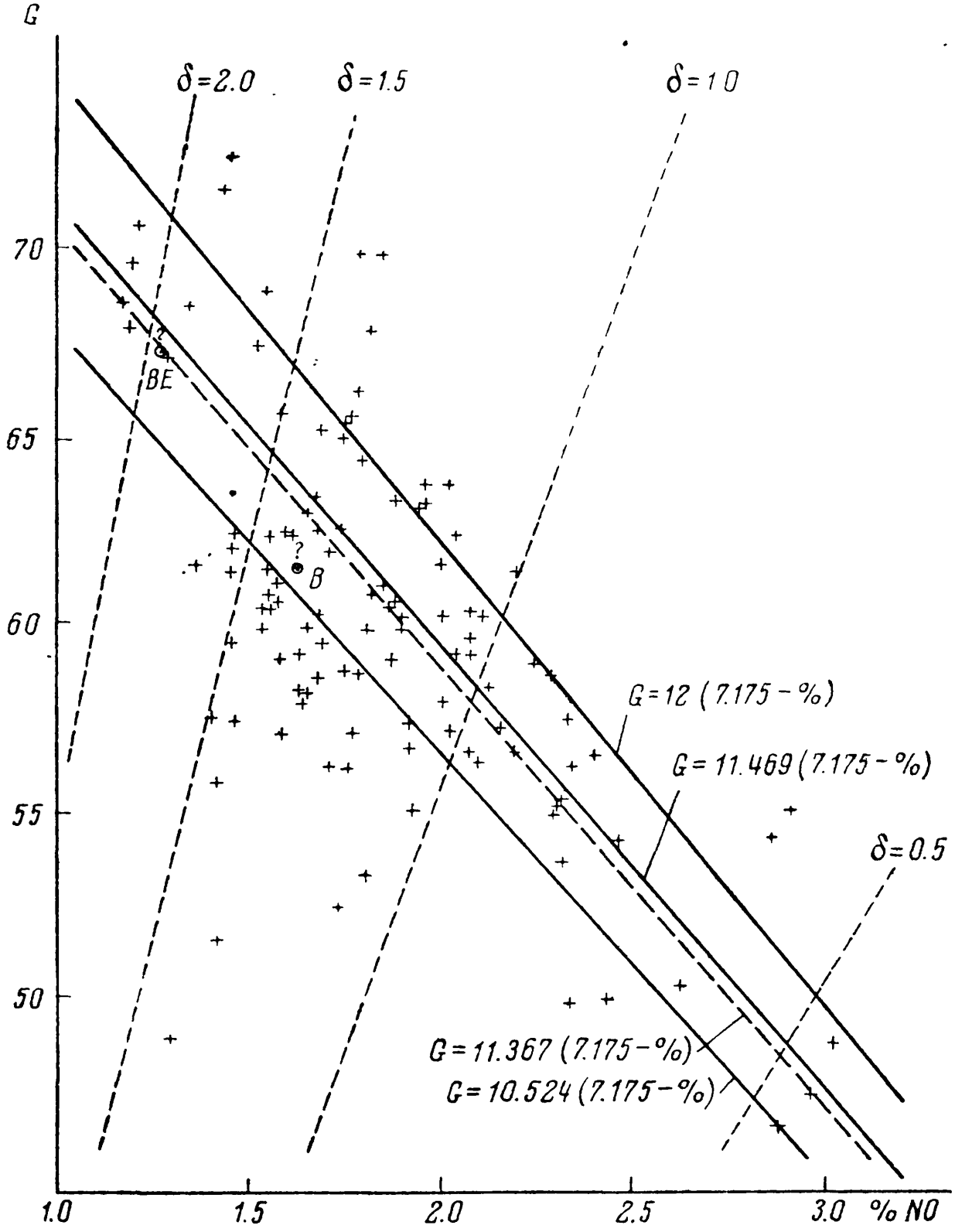


Рис. 14.

Как видно, незначительное увеличение $c_{max.}$ сравнительно с данным для печи № 1 и увеличение почти на 15% величины b сказывается заметно на возрастании среднего выхода HNO_3 на

Таблица 7

	$c_{max.} = b'$	$b'k' = G_{max.}$	b	a
Пределы . .	7.175	78.5—86.1	2.798—3.064	0.39—0.427
Среднее . .	—	83.3	2.931	0.409

	% NO срыва	δ срыва	G срыва	% использования энергии при срыве	Отношение G при срыве к среднему $G_{max.}$
Пределы	—	1.175—1.185	57.6—63.4	2.29—25.1	0.69—0.76
Среднее	1.9	1.13	60.5	2.40	0.73

1 квт-час при срыве (повышает его на 14%) и почти не влияет на цифры последнего столбца. Со знаками вопроса на диаграммах рис. 13 и 14 обозначены точками в кружках данные для печей Биркеланда—Эйде и Баденского завода. Без вопроса нанесена точка для печи Паулинга, работающей в Инсбруке[15]. Данные для последней сообщены самим автором и составляют: $c = 1.5$, $\delta = 1.42$ и $G = 60.0$, при проценте использования энергии, равном 2.38.

Данные для печей № 8 переданы тремя диаграммами: рис. 15 (G—c), рис. 16 (δ—c) и рис. 17 (δ—G). О нанесенных точках см. выше. Ранее объяснено, что сильное расхождение опытных цифр зависит от того, что одной диаграммой передаются собственно данные нескольких приборов, различающихся друг от друга многими деталями конструкции. Девятью черными кружками, расположившимися близко к средней прямой, отмечены опыты, произведенные с особой камерой, которая не дала ожидавшихся от нее высоких результатов, почему опыты с нею не были продолжены. Укажем еще, что многие точки, относившиеся к опытам разных дней, совпадали друг с другом, и это не могло быть отмечено на диаграмме. Численная характеристика дается табл. 8.

В табл. 9 сопоставляем «средние» данные для наших печей:

Таблица 8

	$c_{max.} = b'$	$b'k' = G_{max.}$	b	α
Пределы . .	8.62	83.01—101.37	2.95—3.65	0.342—0.448
Среднее . .	—	92.19	3.30	0.38

	% NO при срыве	δ срыва	G срыва	% использования энергии при срыве	Отношение G при срыве к среднему $G_{max.}$
Пределы	—	1.255—1.535	65.4—79.8	2.59—3.17	0.71—0.866
Среднее	1.85	1.395	72.6	2.88	0.788

Мы имеем, повидимому, право утверждать, что они характеризуются довольно высоким предельным процентом NO, сравнительно незначительной величиной α и довольно высоким коэффициентом использования самой печи (73.7—78.8%).

Таблица 9

№ печи	$c_{max.}$	$G_{max.}$	b	α	% NO срыва	δ срыва	G срыва	% использования энергии при срыве	% использования печи при срыве
1	6.87	72.0	2.55	0.372	1.8	1.045	53.0	2.1	0.737
6	7.72	69.9	2.48	0.322	(1.85)	(0.985)	(51.3)	(2.03)	(0.733)
7	7.175	83.3	2.93	0.49	1.9	1.13	60.5	2.4	0.73
8	8.62	92.2	3.30	0.38	1.85	1.395	72.6	2.88	0.788

Заметное повышение $c_{max.}$, средних граммов HNO_3 на 1 квт-час и b для печи № 8 мы приписываем более высокой плотности энергии в ней, сравнительно с печами №№ 1—7. Накочец, мы должны отметить постоянство процента NO при срыве, который характеризует самые общие и наиболее трудноопределимые условия горения дуги.

Довольно близким условиям отвечают, кажется, некоторые из печей Шеннера, работающие, по сообщению того же д-ра Ебсена, при 0.045 г HNO_3 в 1 литре воздуха и при выходе на

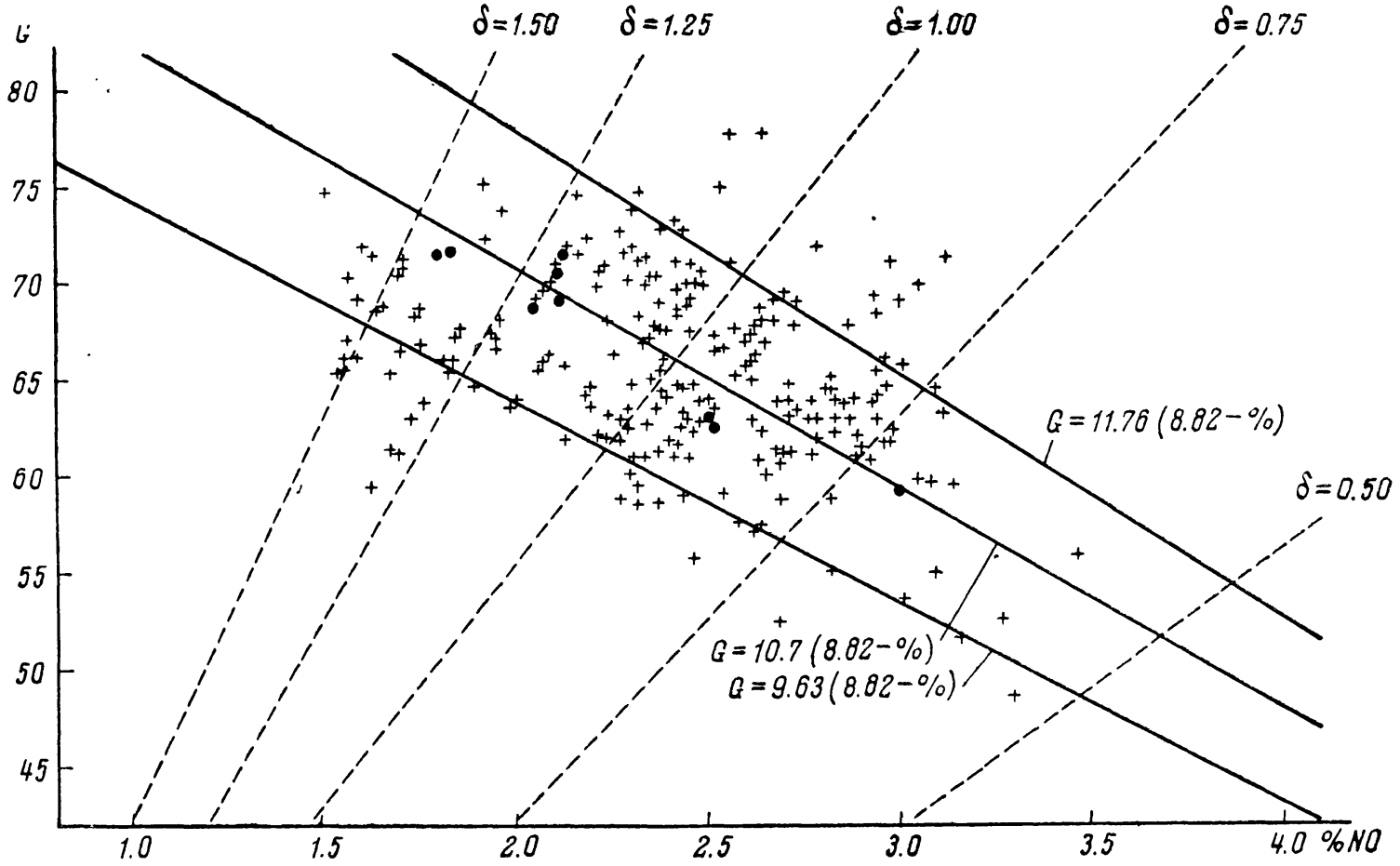

G
δ=1.50
δ=1.25
δ=1.00
δ=0.75
80
75
70
65
60
55
50
45
G=11.76 (8.82−%)
δ=0.50
G=10.7 (8.82−%)
G=9.63 (8.82−%)
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
%NO

Рис. 15.

1 квт-год 540 кг HNO_3. Это дает: $c=1.6$, $\delta=1.37$ и $G=61.65$ при проценте использования энергии, равном 2.45. Мы не знаем, впрочем, к каким печам относятся эти цифры, так как в патентных описаниях Баденской анилиновой и содовой фабрики выход HNO_3 на 1 квт-час указан в 75 г, и он же вычисляется из данных проф. Ф. Ги [8]. По некоторым нашим опытам мы дума-

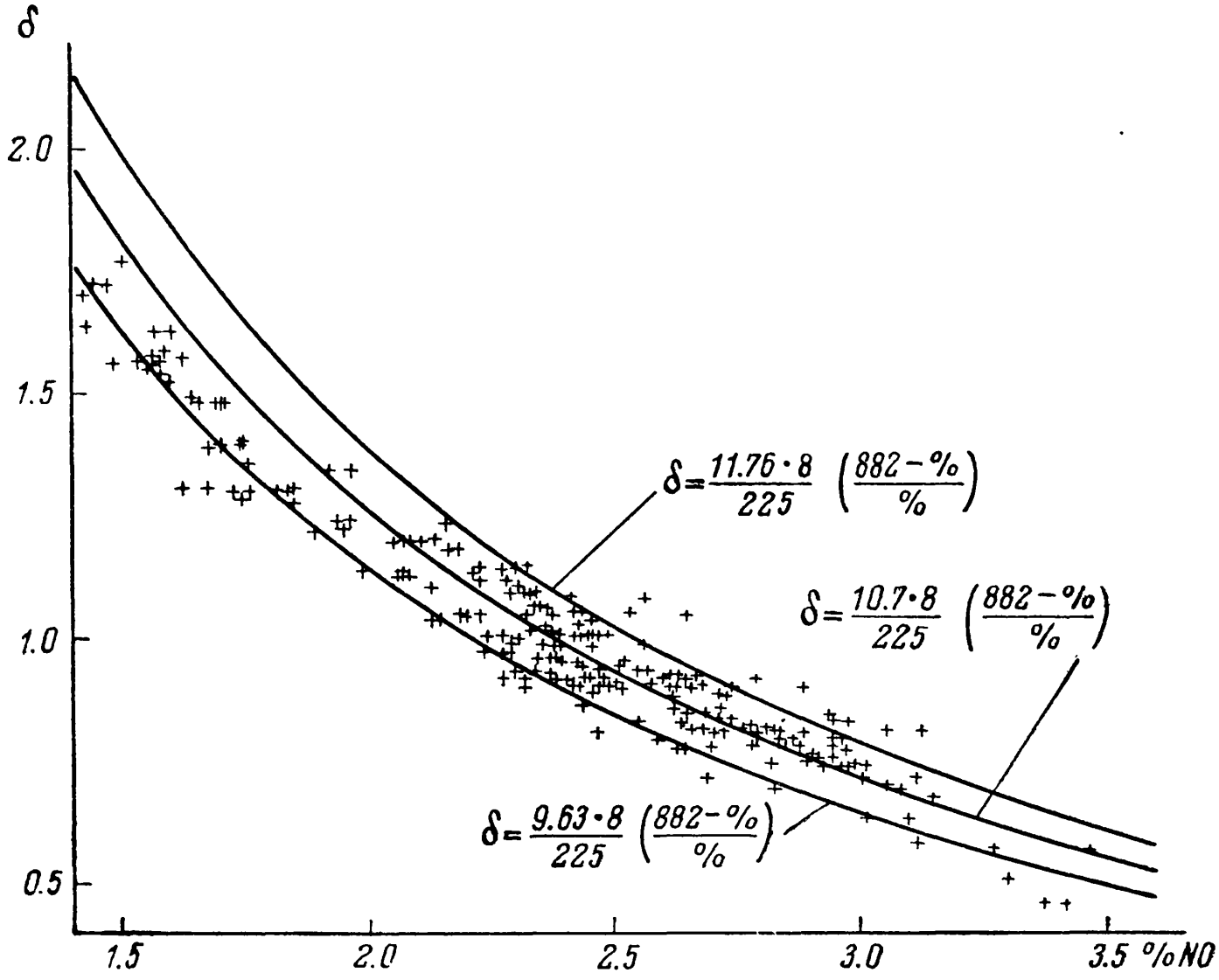


Рис. 16.

ем, что $c_{max.}$ в печах Шённера не ниже 5.9. Если цифра $c=1.6$ приложима и к большим печам в Заахейме, то это значит, что «срыв» в них лежит при c, меньшем, но все же близком к 1.6.

Заканчиваем опытами Кёнига и Хольвеха, результаты которых нанесены на двух диаграммах (рис. 18 и 19). Несмотря на все разнообразие условий, в которых горела дуга, замечательно насколько гиперболы рис. 19 (δ—c) отграничивают опытные точки от остальной площади диаграммы. Средняя прямая линия на диаграмме G—c отвечает уравнению $G=14.55(7.03-c)$, а средняя гипербола диаграммы $\delta=c$ ур.: $\delta=0.517\left(\frac{7.03-c}{c}\right)$.

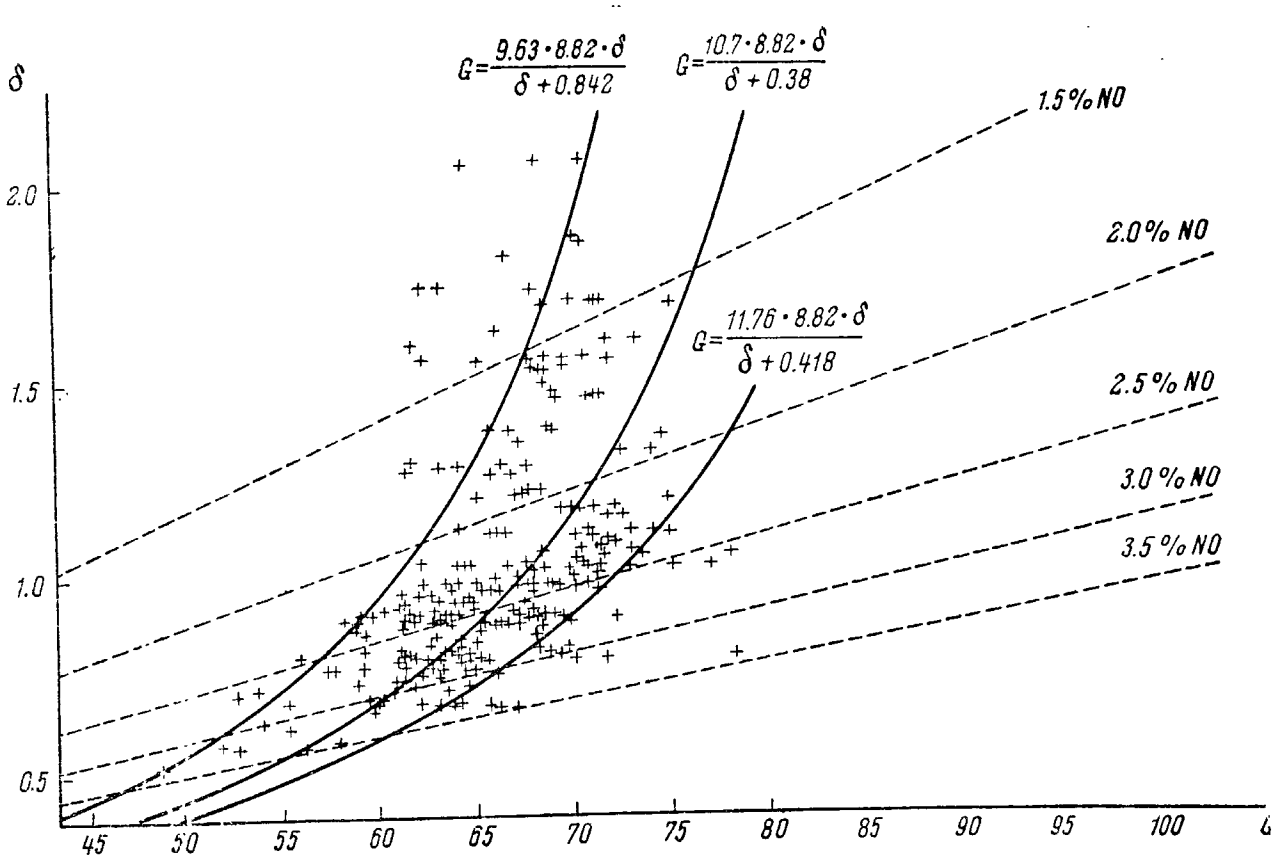

δ
2.0
1.5
1.0
0.5
45
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100
G=9.63·8.82·δ / δ+0.842
G=10.7·8.82·δ / δ+0.38
G=11.76·8.82·δ / δ+0.418
1.5% NO
2.0% NO
2.5% NO
3.0% NO
3.5% NO

Рис. 17.

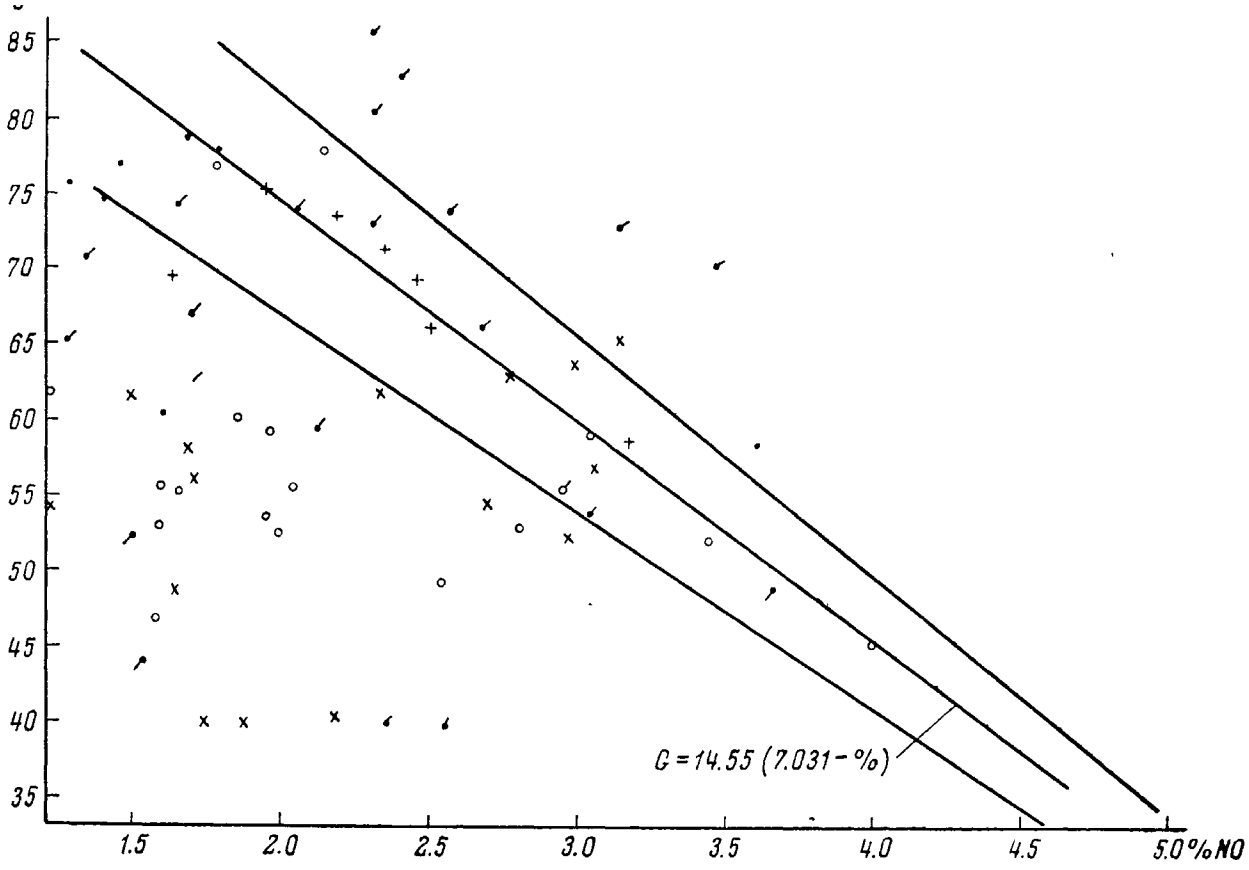


Рис. 18.

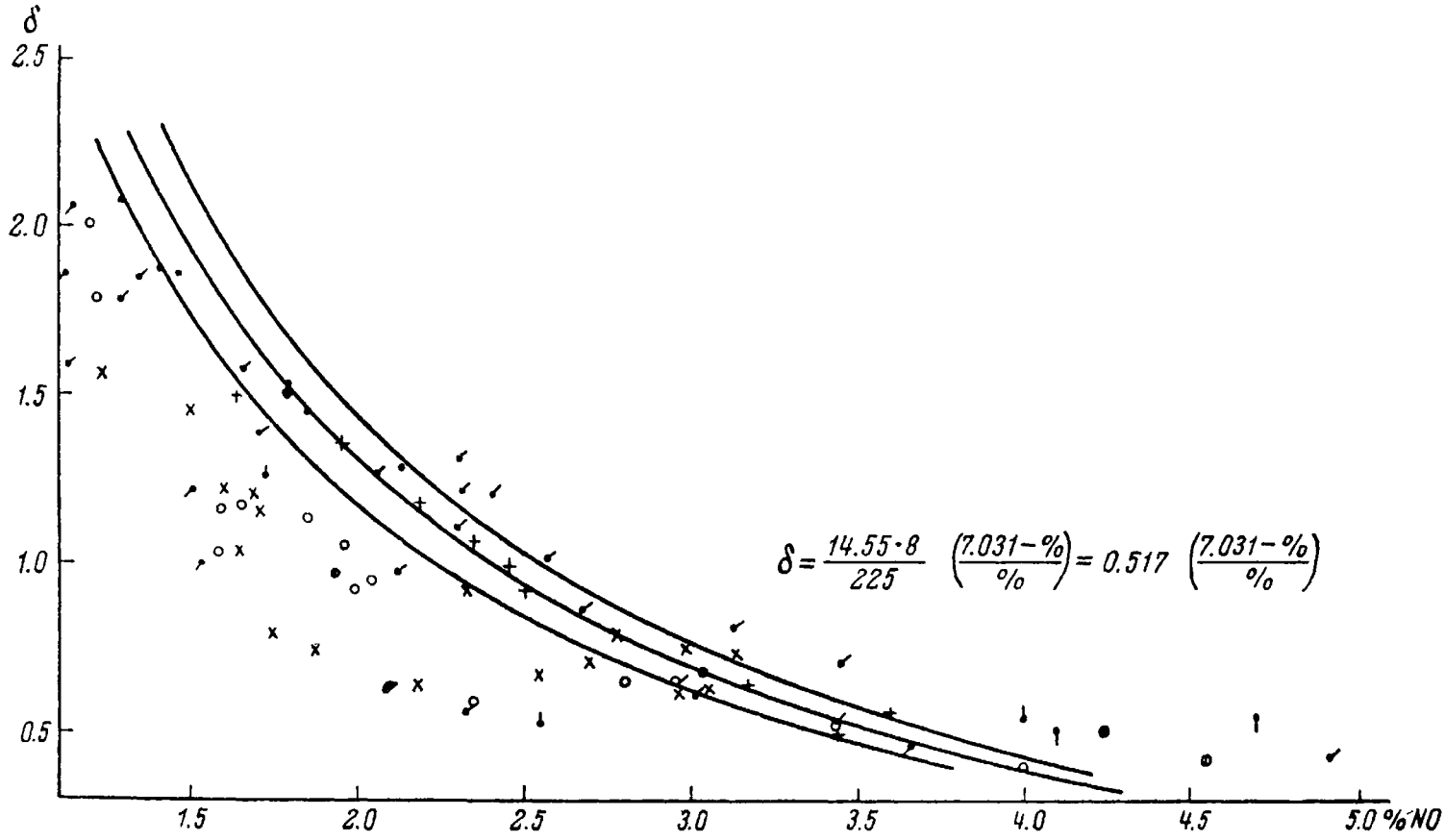

δ
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0 %NO
δ = 14.55·8/225 (7.031−%/%) = 0.517 (7.031−%/%)

Рис. 19.

Это указывает, что печи, построенные на принципе, выработанном Габером, дают возможность достигать высоких концентраций окиси азота при очень хорошем использовании энергии, а так как некоторые данные лежат (на диаграмме G—c) значительно выше верхней пограничной прямой, то надо думать, что печи Габера являются едва ли не наиболее совершенными из всех приборов, предназначенных для сжигания воздуха, и надо сожалеть, что опыты с ними не были проведены в технических размерах.

7. Резюмируем вышеизложенное.

1) Зависимость между процентами (c) окиси азота, образующейся при горении воздуха под влиянием вольтовой дуги, объемом воздуха (δ), вводимого в печь в течение одного часа на каждый киловатт дуги $\left(\delta=\frac{v}{Ph}\right)$, и граммами азотной кислоты, в которую могут быть превращены окислы азота, выражается формулой

$$\frac{8}{225}\,G=c\delta, \qquad \text{(I)}$$

подобной (не только по внешнему виду, но и по смыслу и зависимости входящих в нее величин) газовому уравнению Клапейрона —

$$RT=pv.$$

Уравнение (I) общее: оно не заключает величин, связанных с особенностями того или иного прибора, в котором ведется сожжение воздуха с помощью электрической энергии, и потому приложимо к расчету данных, добытых с любыми печами.

Из него вытекают два общих следствия, относящиеся тоже ко всем приборам, в которых могут получаться с помощью вольтовой дуги из воздуха окислы азота. Одно обратило уже довольно давно на себя внимание исследователей (Брэдлей и Лавджой, Дауггал и Хаулис и др., и особенно Броде *), потому

---

* Броде ([6], стр. 49) писал: «Наблюдается повышение концентрации окиси азота при падении силы тока и падении ваттов... Так как при затрате большего числа ваттов максимальная температура должна быть выше, то должна бы устанавливаться в наиболее горячих местах и местная большая концентрация окиси азота. Но раз опыты дают меньшую концентрацию ее, то ясно, что в пламени при большей затрате ваттов должны существовать условия, благодаря которым большая часть образовавшихся окислов разлагается обратно или на электродах, или же в более холодных частях пламени».

что оно кажется на первый взгляд парадоксальным. А именно, если при данном дутье (данном v) именением условий горения удается сохранить некоторый определенный процент NO, то число граммов HNO_3 на 1 квт-час тем выше, чем меньше киловатты, питающие дугу. Пределом уменьшения мощности является предел устойчивости дуги, когда «дуга срывается» и использование энергии понижается. Обратно, при тех же условиях, повышение мощности дуги понижает выход.*

Второй вывод тот, что одно и то же количество HNO_3 на один киловатт-час может быть получено при разных концентрациях (больших и меньших) окиси NO, если при постоянной мощности дуги и изменяющихся условиях горения ее проценты окиси азота меняются обратно пропорционально скорости продувания воздуха (см. диаграмму рис. 9). Во время горения процент NO не известен точно экспериментатору, и указанным изменением его трудно управлять. Вывод, однако, подтверждается при большом числе наблюдений, когда некоторые дадут случайно требуемые условия.

2) Общая зависимость между дутьем и процентом окиси азота в выходящих из печей газах может быть выведена априорно, если допустить, что отступление технических приборов от идеальных выразимо в виде некоторого дутья, налагающегося на действительно вводимый в печь воздух. Рассмотрение процесса с этой точки зрения привело нас к убеждению, что в пределах концентрации окислов азота, которые практически используются в настоящее время, зависимость эта выражается гиперболической формулой

$$c = \frac{b}{\delta + \alpha}, \qquad \text{(II)}$$

где b — максимальное число граммов HNO_3, которые могут быть выработаны в данной печи, при некотором определенном режиме, в течение 128 сек., а α есть величина, эквивалентная некоторому дутью и характеризующая отступление этой же печи от идеальных условий; в связи с b величина α определяет коэффициент использования энергии.

---

* Это тоже было отмечено. Так, Морден[10] говорит в своих выводах: «...для каждой скорости продувания воздуха возможна максимальная концентрация окиси азота (пропущено, но подразумевается: при данной мощности дуги и данном проценте использования энергии, — *Г.* и *М.*). Если повысить силу тока выше необходимой для достижения максимума, то наблюдается понижение выхода HNO_3 на 1 квт-час».

Выражение (II) показывает, что

$$\delta = \frac{\alpha(b' - c)}{c}. \quad * \qquad \text{(II bis)}$$

где $b' = \frac{b}{\alpha}$.

В связи с (I) уравнение (II bis) позволяет вывести зависимость между граммами HNO_3 на 1 квт-час и процентами NO, а именно:

$$G = \frac{225}{8} \alpha (b' - c), \qquad \text{(III)}$$

а уравнение (II) вместе с (I) дает зависимость между граммами HNO_3 на 1 квт-час и δ, а именно:

$$G = \frac{225}{8} \cdot \frac{b}{\delta + \alpha} \delta. \qquad \text{(IV)}$$

Мы считаем уравнения (II), (II bis), (III) и (IV) тоже общими в том смысле, что они, вероятно, приложимы к данным, добытым с любыми электрическими печами.

3) Сопоставление уравнения (III) со следствием из (I), гласящим, что печи могут работать при постоянном выходе HNO_3, но при переменных процентах NO и дутье, приводит к выводу, что для каждой печи возможно не одно уравнение вида (III), а ряд их, отвечающий условиям различного использования энергии. «Нормальной мощности» отвечает максимум использования энергии и «нормальные» константы уравнений (II), (III) и (IV). На диаграммах G—c, данных выше, этим условиям удовлетворяют верхние прямые, а на остальных диаграммах (δ—c и δ—G) соответственные гиперболы.

4) Мы сходимся с Грау и Руссом, Брионом, когда на основании опытных данных приходим к заключению, что в этом ряде уравнений при переменных значениях (в известных пределах) величин α и b, представляющих последовательно α'' и b'', α''' и b''' и т. д., остается постоянным их отношение, имеющее

---

* В диссертации Мордена имеется ([12], стр. 52) диаграмма, названная, графическим изображением связи скорости газа и процентов окиси азота. В ней по ординатам отложены проценты NO, а по абсциссам литры воздуха в час, отнесенные, повидимому, к переменным ваттам. Опытные точки соединены пунктирными ломаными линиями, не позволяющими видеть почти никакой правильности.

физический смысл теоретического, предельного для данной печи процента NO, т. е.

$$\frac{b''}{\alpha''} = \frac{b'''}{\alpha'''} \ldots = \text{const.} = b = c_{\max.} .*$$

Благодаря постоянству этого отношения на диаграмме G—c каждая печь характеризуется семейством прямых, начинающихся в точке b', и идущих вверх справа налево, расходясь веерообразно, причем между крайними прямыми умещается огромное большинство опытных точек.

Постоянство b' не вытекает непосредственно из наших уравнений, но оно находится в согласии с основной гипотезой (см. стр. 107), приведшей нас к выражению

$$c = \frac{b}{\delta + \alpha}.$$

5) Затронутое выше обстоятельство, заключающееся в существовании пределов устойчивости дуги, в возможности ее «срыва», совершенно не нашло выражения в уравнениях (II), (IIbis), (III) и (IV), описывающих, следовательно, в этом отношении явления горения воздуха в вольтовой дуге недостаточно полно.

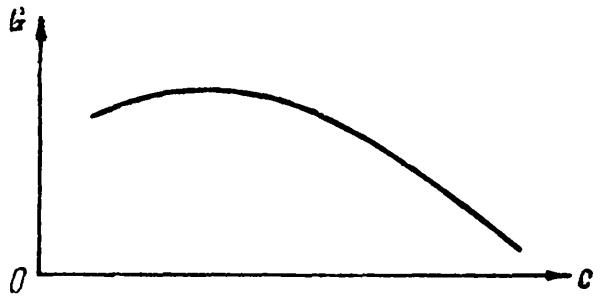


Рис. 20.

6) Кроме того, наши опытные данные привели нас к заключению, что концентрация окиси азота при «срыве» не зависит от мощности дуги и почти не зависит от деталей конструкции печи, а характеризует лишь «тип» ее. Возможно, что это заключение, основанное все же на сравнительно небольшом числе данных, окажется недостаточно точным. Пока нам пришлось считаться с замечательным постоянством этой величины для наших печей; мы приняли ее за характерную постоянную и вычислили на основании ее практически достижимый максимум HNO_3 на 1 квт-час и коэффициент практически осуществимого использования данной печи (последний столбец табл. 3—8).

Что касается самого существования подобного максимума, то таковой давно уже отмечен Брионом, который, относя расхождение опытных точек, повидимому, насчет ошибок опыта,

* В отличие от указанных исследователей (и Раша) мы считаем $c_{\max.}$ характерным не для самой вольтовой дуги, а для дуги лишь в данной печи.

изобразил свои наблюдения для модели печи Мосцицкого кривой вида рис. 20.

Мы считаем такой прием сглаживания результатов наблюдения принципиально неправильным, потому что при нем берется (иногда может быть графически) некоторое среднее из опытов, прошедших, как при малых коэффициентах использования энергии (при минимальном $\mathrm{tg}\alpha$), которые указывают на неправильное и недопустимое функционирование изучаемой печи, так и при условиях, которые можно для нее считать нормальными (см. выше, стр. 139) и удержание которых зависит от воли и умения экспериментатора.

По нашему мнению, пологий максимум распределения опытных точек на диаграмме $G — c$ объясняется таким образом. С одной стороны, эти точки распределяются между сходящимися линиями ab и cd (схематический рис. 21), которые, вообще говоря, не удается довести до координатных осей; а с другой стороны, при больших δ и «срыве» дуги результаты опытов, сделанных при данных δ, располагаются между прямыми ef и gh, тоже веерообразно расходящимися, но уже из начала координат. Таким образом, опытные точки распределяются по системам взаимно пересекающихся линий, и если i — есть процент NO при срыве, когда использование энергии начинает падать, а дуга становится малоустойчивой, то ожидать тут резкого максимума очень трудно. Как практический результат из вышесказанного вытекает выгодность выбора тех «нормальных» условий, которые отвечают наибольшему «нормальному» $\mathrm{tg}\alpha$ и концентрациям окиси азота, более высоким, но не особенно удаленным от процента NO при срыве.

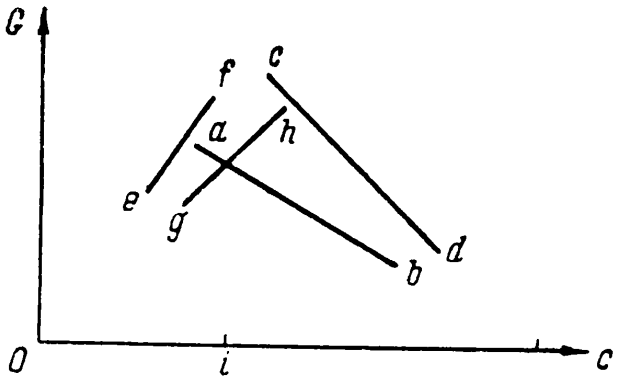


Рис. 21.

7) Кончаем замечанием о величинах b, b' и α. Что касается двух первых, то мы считаем их характеризующими главным образом плотность энергии в той области, где образуется NO, и думаем, что в современных технических приборах возможно еще значительное движение в направлении их увеличения. Величину же α мы считаем выгодным иметь возможно меньше.

В заключение отметим, что при практическом сравнении печей, кроме предлагаемых выше коэффициентов и процентов NO «при срыве», приходится еще считаться с рядом незатрону-

тых обстоятельств. Между прочим, приходится учитывать, что в некоторой данной печи нельзя расходовать сколь угодно большую мощность и что для нее существует такая мощность, при которой осуществим максимум использования энергии (см. стр. 138).

Важно затем иметь печи возможно большей мощности, так как это значительно упрощает надзор за их правильным функционированием. Необходимо, чтобы они не были слишком громоздки, чтобы были сделаны из не особенно дорогих материалов, чтобы были просты по конструкции и легко позволяли заменять части, пришедшие в негодность и т. д. Электроды их не должны загрязнять пеплом (золою) газопроводов, труб котлов и поглотительных башен; необходимо, чтобы по мере сгорания их было легко заменять новыми или наращивать и т. д. и т. д. Всех этих вопросов мы не считали возможным касаться, как лежащих совершенно в стороне от выбранной нами темы.

Литература

[1] Миткевич В. Ф., Горбов А. И., Труды 1-го Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, состоявшегося в С.-Петербурге с 20 по 30 декабря 1907 г. СПб., изд. Распор. ком. съезда, 1909.
[2] Сапожников А. Азотная кислота и селитра из воздуха. СПб., 1911.
[3] Birkeland, Jahrb. der Radioactiv, und Elektronik, Bd. 3, 1906.
[4] Le Blanc, Nüranen, Zeitschr. Elektroch., Bd. 13, 1907.
[5] Brion, там же.
[6] Brode J. Ueber die Oxydation des Stickstoffes in der Hochspannungsflamme. Halle, 1905.
[7] Guy Ph. A., Journ. of the S. of ch. Ind., 1907.
[8] Guy Ph., Zeitschr. Elektroch., Bd. 16, 1910.
[9] Grau, Russ, Zeitschr. Elektroch., Bd. 13, 1907.
[10] Holwech, König A., Zeitschr. Elektroch., Bd. 16, 1910.
[11] König A. Ueber die Oxydation des Stickstoffes im gekühlten Hochspannungsbogen bei Minderdruck. Halle, 1908.
[12] Morden. Die Stickoxydbildung aus Luft etc. Karlsruhe, 1909.
[13] Nernst, Zeitschr. anorg. Chem., Bd. 49, 1906.
[14] Jellinek, там же.
[15] Pauling, Zeitschr. Elektroch., Bd. 15, 1909.
[16] Rasch E., Zeitschr. Elektroch., Bd. 13, 1907.
[17] Scheuer O. Recherches sur la préparation des oxydes d'azote au moyen de décharges à haute tension. Geneve, 1905.
[18] Spiel H. Ueber die Bildung von Stickoxyden bei der elektrischen Entladung im Siemensrohr. Wien und Leipzig, 1911.
[19] Witt. Das neue technisch-chemische Institut der Königlichen technischen Hochschule zu Berlin. Berlin, 1906.
[20] Zennek. Die Verwertung des Luftstickstoffes mit Hilfe des elektrischen Flammenbogens. Leipzig, 1911.

ЭЛЕКТРОДЫ-ЗОНДЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ РАБОТ С ЭЛЕКТРОЛИТАМИ

ЖРФХО, ч. физ., т. 38, в. 2, 1906, стр. 71—73

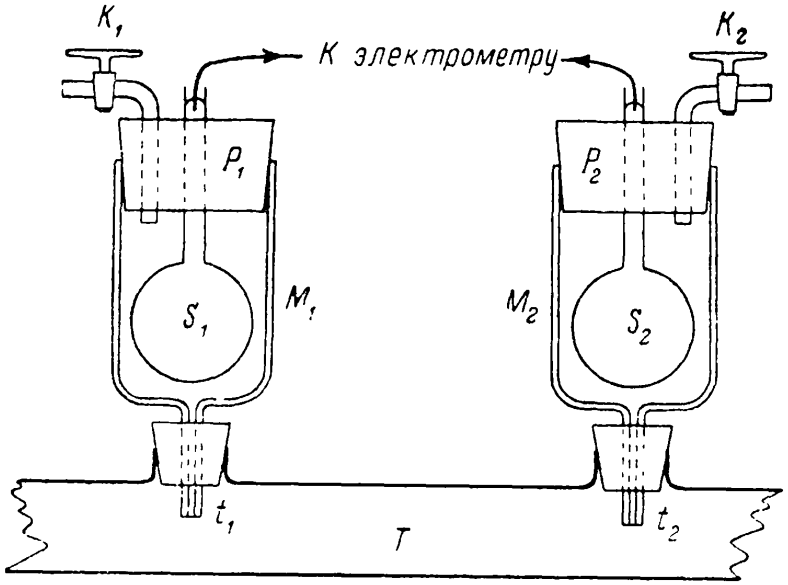
Иногда при определении сопротивления электролитов по тем или иным соображениям может оказаться выгодным прибегнуть к так называемому способу амперметра и вольтметра, т. е. вычислять сопротивление по силе тока и разности потенциалов. Определение силы тока никаких затруднений не представляет.

Иначе обстоит дело с определением разности потенциалов между двумя точками в электролите. Здесь могут встретиться различные обстоятельства, осложняющие точное измерение разности потенциалов. В этом отношении главное значение имеют явления, возникающие на поверхностях соприкосновения электролита с электродами-зондами, без которых в данном случае, вообще говоря, обойтись невозможно.

Обыкновенно применяются металлические, например, платиновые, электроды-зонды. Измерение разности потенциалов при помощи гальванометра с большим сопротивлением до́лжно признать недопустимым ввиду поляризации электродов-зондов. Повидимому, в данном случае единственным средством измерения является применение электрометра. Однако способ этот можно считать безупречным только постольку, поскольку тождественны условия, в которых находятся оба электрода-зонда. В тех же случаях, когда, например, электроды-зонды находятся в местах с различной температурой или когда электролит неоднороден, необходимо принимать специальные меры к тому, чтобы контактные разности потенциалов на концах электродов-зондов не влияли на результат.

Я полагаю, что в данном случае можно следующим способом устроить электроды-зонды, вполне безупречные в вышеуказанном отношении. На прилагаемом чертеже схематически

изображено подобное устройство. Каждый электрод-зонд состоит из стакана M, оканчивающегося внизу капиллярной трубкой t, которая в этом случае играет роль зонда и вставляется внутрь трубки T или аналогичного сосуда, содержащего иссле-



дуемый электролит. Стакан M закрывается пробкой P, сквозь которую проходят две стеклянных трубки. Одна из них снабжена краном K и служит для втягивания электролита внутрь стакана M. Другая оканчивается в стакане шаром S, который заполняется ртутью, соединяемой металлически с одним из зажимов электрометра.

Таким образом, электрометр оказывается включенным последовательно с двумя конденсаторами, обкладками которых служат ртуть и электролит, а диэлектриком — стеклянные стенки шаров S. Ясно, конечно, что электрометр при таком расположении будет показывать не полную разность потенциалов между теми местами, куда помещены зонды, но лишь известную часть этой разности потенциалов — в зависимости от соотношения емкостей зондов и самого электрометра. Это, впрочем, не представляет никакого осложнения: стоит только предварительную градуировку электрометра производить через емкости электродов-зондов. Для этого может оказаться более удобным наполнять стаканы M ртутью вместо электролита или просто вынуть пробки P из стаканов M и опустить шары S в другие стаканы со сплошным дном, заполненные ртутью.

Для того, чтобы судить о том, какого порядка должна быть чувствительность электрометра, приведу следующие данные.

Если радиусы шаров (внутренний и внешний) равны соответственно 7 и 7.5 мм, то емкость каждого конденсатора-зонда

будет порядка 500 электростатических единиц. Принимая же емкость электрометра в 50 электростатических единиц, не трудно подсчитать, что разность потенциалов у зажимов электрометра будет составлять около 85% полной разности потенциалов между концами электродов-зондов.

Таким образом, ясно, что выбор подходящего электрометра для работы с вышеописанными электродами-зондами не может представить каких-либо затруднений.

К ТЕОРИИ ФЛЮКСМЕТРА ГРАССО

ЖРФХО, ч. физ., т. 38, в. 2, 1906, стр. 86—94

1. Флюксметр Грассо представляет собою прибор, благодаря которому необычайно просто разрешается вопрос об измерении величины магнитного потока или силы магнитного поля, что было до настоящего времени делом довольно сложным. Теперь измерения этих физических величин значительно проще (например, измерения электрического сопротивления). Таким образом, надо думать, что в недалеком будущем прибор Грассо получит весьма большое распространение в лабораторной практике.

Флюксметр есть в сущности не что иное, как гальванометр типа Депре—Дарсонваля, в котором пара кручения в подвесном приспособлении столь мала, что практически момент ее можно считать равным нулю. Прибор этот в том виде, какой ему придала «Компания по изготовлению электроизмерительных приборов» (Париж), устроен следующим образом.

Подвижная катушка K_1 (рис. 1) подвешена на коконовой нити C, верхний конец которой поддерживается спиральной пружиной Z, предназначенной для смягчения толчков и для сохранения нити в целости. Ток подводится к катушке при посредстве двух цилиндрических спиралей P и P' из чрезвычайно тонкой серебряной ленты. Вертикальные ветви катушки могут перемещаться между полюсами магнита NS и сердечником A. Сила поля в междужелезном пространстве равна приблизительно 1000 гс. К катушке прикреплена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы с делениями, которые все равны в случае радиального поля постоянной силы, что в приборе и осуществлено. Посреди шкалы стоит нуль, от которого деления идут по обе стороны. Наконец, стрелка приводится на нуль, и вся система арретируется при посредстве специального приспособления.

Во время измерений магнитных потоков или силы поля к зажимам прибора присоединяется плоская катушка K_2, специально подбираемая для каждого частного случая. Предположим, что в момент, когда арретир отпущен и стрелка стоит на нуле, магнитный поток, пронизывающий катушку K_2, равен нулю. Если теперь внести катушку K_2 в магнитное поле или вдвинуть в нее магнит, одним словом, если каким-либо образом создать поток, который пронизывал бы катушку K_2, то стрелка флюксметра сойдет с нуля и переместится на число делений, как раз пропорциональное этому потоку. И в этом новом положении стрелка остается все время, пока поток, пронизывающий K_2, сохраняет свою величину, ибо практически пара кручения равна нулю. Подобно тому, как в пружинных весах положение указателя на шкале позволяет оценивать величину массы, подвешенной к крюку весов, и в флюксметре положение стрелки на шкале позволяет оценивать величину магнитного потока, пронизывающего соединенную с прибором катушку.

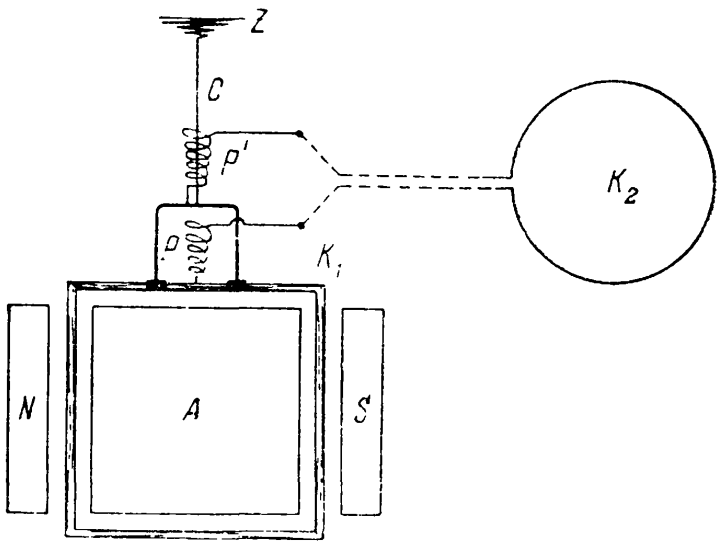


Рис. 1.

Флюксметр Грассо может быть полезен решительно во всех случаях в области магнитных измерений. Между прочим, при помощи этого прибора весьма просто можно исследовать поток, пронизывающий различные сечения постоянного магнита или электромагнита. Применение флюксметра может сделать еще более изящным способ Юинга для получения кривых гистерезиса. Вообще прибор этот может оказать большую услугу при изучении магнитных свойств веществ, ибо он может улавливать очень медленные изменения магнитного потока. Измерение силы поля (земного или в междужелезном пространстве динамо) можно производить при помощи катушки, площадь витков которой известна.

2. Автор прибора, Грассо, дает следующую теорию его действия ([1], стр. 27).

В подвесном приспособлении флюксметра момент пары кручения ничтожно мал, практически равен нулю (см. выше).

Если соединить прибор с источником слабой электродвижущей силы, то подвижная катушка будет перемещаться, не совершая никакой работы. При этом скорость перемещения будет такова, что возникающая в катушке обратная электродвижущая сила будет почти равна приложенной извне. Таким образом, обозначая через α перемещение и через E внешнюю электродвижущую силу, имеем

$$\frac{d\alpha}{dt} = kE,$$

откуда

$$\alpha = k \int E dt.$$

Когда катушка перемещается в поле прибора, поток, пронизывающий ее, изменяется. Обозначив возникающий вновь в катушке поток через Φ, имеем

$$\alpha = k\Phi.$$

Итак, магнитный поток, вошедший в катушку благодаря ее движению, равен и противоположен $\int E dt$ у зажимов прибора.

Предположим теперь, что к зажимам прибора присоединена катушка из определенного числа витков и что поток, пронизывающий эту катушку, изменяется. Возникающая при этом электродвижущая сила индукции $E = \frac{d\Phi}{dt}$ и будет как раз играть роль внешней электродвижущей силы, приложенной к зажимам прибора. Когда изменение потока закончится, то мы будем иметь у зажимов

$$\int E dt = \Phi.$$

Мы, таким образом, видим, что изменение потока, пронизывающего внешнюю катушку, сопровождается соответствующим определенным перемещением стрелки.

Изложенная теория флюксметра точна постольку, поскольку верно предположение, что обратная электродвижущая сила, развивающаяся в катушке прибора, численно равна внешней электродвижущей силе E, приложенной к зажимам. Это бывает действительно так в случае постоянной E и при установившемся движении катушки прибора. В начале и в конце движения это уже неверно.

Точно так же это неверно в общем случае, когда E есть какая угодно функция времени. Так, например, если изменение потока в катушке K_2 (рис. 1) закончится в промежуток времени ничтожно малый, то в силу инерции подвижной катушки K_1 обратная электродвижущая сила будет равна нулю во все вре-

мя, пока E не равна нулю, а затем обратная э.д.с. получит некоторое конечное значение (при движении катушки K_1), но при этом E будет сохранять величину, равную нулю. Вывод Грассо совершенно неприменим к данному случаю и вообще, когда E, другими словами, поток, пронизывающий внешнюю катушку K_2, как угодно изменяется с течением времени. А между тем флюксметр дает верные показания совершенно независимо от того, как именно изменяется поток сквозь внешнюю катушку.

Таким образом, приходится признать, что вывод Грассо не может дать нам полного объяснения свойств флюксметра.*

3. Мне кажется, что можно дать совершенно общую и весьма простую теорию флюксметра, не обращая никакого внимания на возникающие в цепи прибора электродвижущие силы. Для этого необходимо только рассмотреть импульсы, получаемые подвижной частью прибора за все время ее перемещения. Результат, к которому мы в этом случае придем, показывает, что действие флюксметра подчинено одному общему принципу. Флюксметр представляет собою лишь одну из его иллюстраций. Ввиду этого я скажу сначала несколько слов об этом принципе, который, говоря по существу, всем хорошо известен.

Я имею в виду принцип инерции в системе токов. В динамической теории электромагнетизма, данной Максвеллом, силы токов рассматриваются как первые производные от координат (количество электричества), т. е. играют роль скоростей. Инерция системы проводников с токами характеризуется величинами, представляющими собою частные производные от электрокинетической энергии системы по соответствующим силам токов и обладающими свойствами количества движения. Максвелл так и называет эти величины electrokinetic momenta — количествами движения в электрокинетическом процессе. Мы будем обозначать их буквами Φ, ибо они выражают собою не что иное, как именно магнитные потоки, пронизывающие соответствующие контуры проводников. Итак, по теории Максвелла, магнитный поток Φ, пронизывающий некоторый контур в системе токов, имеет свойства количества движения. И это справедливо независимо от того, какова сила тока в рассматриваемом контуре, т. е. справедливо и для случая, когда сила тока в этом контуре равна нулю.

---

* Это, впрочем, — мое личное мнение, не всеми разделяемое. Так, например, Б. П. Вейнберг высказал во время доклада мысль, что вывод Грассо может быть дополнен и обобщен для всех случаев.

При движении материальных масс, количество движения P стремится сохранить свою величину. При всяком изменении P возникают даламберовские силы инерции, стремящиеся противодействовать производимому изменению.

Магнитный поток сквозь данный контур (Φ) тоже стремится сохранить свою величину. Как всем хорошо известно, при всяком изменении Φ возникает электродвижущая сила индукции, которая стремится противодействовать изменению Φ. Сверх того, и, конечно, не случайно, всегда при изменении Φ появляются чисто механические силы, стремящиеся так изменить положение или форму данного контура, чтобы Φ осталось постоянным по величине.

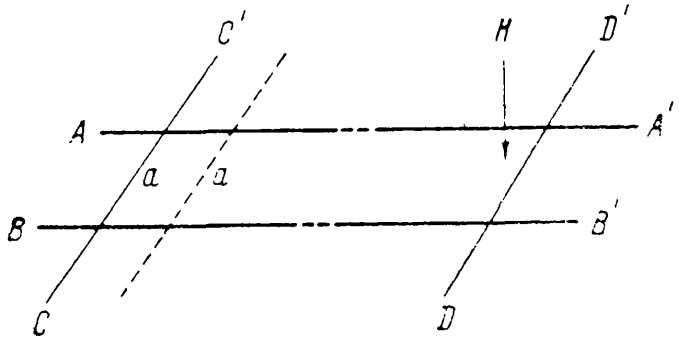


Рис. 2.

Практически обыкновенно Φ, хотя и стремится сохранить, но не сохраняет своей величины. Есть, однако, случаи, когда вполне осуществляется постоянство величины Φ, т. е. когда несмотря ни на какие попытки изменить поток, пронизывающий данный контур, величина его в конце концов всегда восстанавливается, и в результате он остается неизменным.

Подобный случай в простейшем виде представлен на рис. 2. AA' и BB' суть два рельса — проводника, параллельных друг другу. На них лежат перпендикулярно к ним два прямолинейных проводника CC' и DD', которые могут скользить вдоль рельсов без разрыва образуемой четырьмя проводниками замкнутой цепи. Допустим, что сквозь эту цепь проходит некоторый магнитный поток Φ, относительно которого мы введем некоторое условие. Именно: положим, что магнитное поле в области проводника DD' однородно, а также — и это мы принимаем только ради простоты рассуждений — направление поля в этом месте составляет прямой угол с направлениями рельсов и скользуна DD'. Допустим, наконец, что DD' может скользить вдоль рельсов без всякого трения.

Переместим теперь CC' из положения a в положение a'. При этом, вообще говоря, CC' пересечет часть магнитного потока Φ. Во все время перемещения CC' в нашем контуре будет существовать электродвижущая сила индукции, которая вызовет в контуре ток. Благодаря этому току проводник DD', находящийся в магнитном поле H, придет в движение. В конце кон-

цов DD', переместившись в некоторое новое положение, остановится, когда весь запас его кинетической энергии истощится. Итак, проводник DD' под влиянием некоторых механических сил выходит из состояния покоя, движется и, наконец, снова приходит в состояние покоя. Следовательно, изменение количества движения проводника DD' за все время перемещения равно нулю. А следовательно, равна нулю и сумма всех импульсов, которым был подвержен проводник DD' за все время рассматриваемого процесса.

Обозначая механическую силу, приложенную к DD', через F, можем написать:

$$\int F dt = 0,$$

при условии, что интегрирование распространено на все время перемещения. Но проводник DD' скользит вдоль рельсов без всякого трения. Единственная механическая сила, которой подвержен этот проводник, есть сила взаимодействия тока и магнитного поля. Обозначив отрезок DD' между рельсами через l, имеем

$$F = Hli,$$

а потому

$$\int Hlidt = 0.$$

Отсюда имеем

$$\int Hlidt = Hl \int idt = HlQ = 0,$$

где через Q мы обозначаем $\int idt$, т. е. полное количество электричества, протекшее через цепь за время перемещения DD'. Так как H и l величины конечные, то очевидно

$$Q = 0.*$$

Обозначив через $\Delta\Phi$ изменение магнитного потока, пронизывающего контур, через R_1 наименьшее сопротивление контура во время рассматриваемого процесса и через R_2 наибольшее его сопротивление, будем иметь на основании фарадеевского закона индукции

$$\frac{\Delta\Phi}{R_1} > Q > \frac{\Delta\Phi}{R_2}.$$

* Из того, что Q=0, конечно, не следует, что в цепи не выделяется джоулева тепла. Из того, что $\int idt = 0$, не следует, что $\int i^2 r dt = 0$. Джоулево тепло в рассматриваемом контуре выделяется за счет энергии того деятеля, который перемещает проводник CC'.

Так как $Q = 0$, то очевидно, что и

$$\Delta\Phi = 0.$$

Если бы мы пытались изменить Φ не сдвижением CC', а каким-либо иным способом, например, если бы мы, закрепив предварительно CC' неподвижно, внесли внутрь контура стальной магнит или, вообще, изменяли Φ извне, то и тогда все наши рассуждения остаются справедливыми, и тогда

$$\Delta\Phi = 0,$$

т. е. в рассматриваемом случае поток сквозь контур действительно сохраняет свою величину. Следовательно, всякое изменение Φ в одной части контура всегда автоматически компенсируется равным, но обратным изменением Φ в другой части контура. Зная второе, мы всегда можем судить и о первом.

Вышеприведенные рассуждения остаются совершенно справедливыми, с какою бы скоростью мы не перемещали CC' или, вообще, каков бы ни был закон изменения Φ в одной части контура. Кроме того, результат совершенно не зависит от массы проводника DD'. От этой массы зависит только время, в течение которого закончится перемещение DD'.

4. Обратимся теперь к флюксметру. Во время измерения при помощи этого прибора подвижная часть его, бывшая сначала в покое, приходит в движение и затем опять останавливается. Следовательно, момент количества движения подвижной части за все время перемещения не получает никакого приращения. Другими словами, сумма импульсов всех пар сил, действующих на подвижную часть во время перемещения, равна нулю. Но в подвесном приспособлении нет ни кручения, ни трений, а потому на подвижную часть действуют только силы электромагнитного происхождения.

Следовательно, обозначив через l, d и n_1 длину, ширину и число витков подвижной катушки K_1 (рис. 1), имеем

$$\int Hldn_1 dt = 0.$$

Далее имеем

$$\int Hldn_1 i\,dt = Hldn_1 \int idt = kQ = 0.$$

Обозначая через Φ весь поток, пронизывающий контур катушек K_1 и K_2, и через R сопротивление всей цепи, имеем

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R} = 0.$$

Откуда, так как R конечно,

$$\Delta\Phi = 0.$$

Если Φ_1 и Φ_2 представят собою величины потоков сквозь площади обеих катушек, а n_1 и n_2 — числа витков в этих катушках, то

$$\Phi = \Phi_1 n_1 + \Phi_2 n_2.$$

На основании этого

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 n_1 + \Delta\Phi_2 n_2 = 0,$$

$$n_1 \Delta\Phi_1 = -n_2 \Delta\Phi_2.$$

Откуда

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{n_1}{n_2} \Delta\Phi_1.$$

Таким образом, всякое изменение магнитного потока сквозь площадь катушки K_2, находящейся вне прибора, сопровождается пропорциональным ему обратным изменением потока сквозь площадь катушки K_2, находящейся внутри прибора. А так как на шкале прибора нанесены деления, как раз пропорциональные величине магнитного потока, проходящего через площадь подвижной катушки, то ясно, что мы можем прямо по шкале прибора отсчитывать величину потока сквозь пробную катушку, соединенную с прибором, если, конечно, сначала этот поток был равен нулю.

Предлагаемая теория флюксметра обща в том смысле, что она справедлива при каком угодно законе изменения потока внутри пробной катушки. Этот поток может возникать хоть мгновенно. Кроме того, из этого же вывода ясно, что величина момента инерции подвижной части прибора теоретически не имеет никакого влияния на результат. (Практически, конечно, невыгодно чрезмерно увеличивать момент инерции подвижной части, ибо при этом удлиняется время наблюдения и могут возрасти ошибки, происходящие от сотрясений прибора извне).

Как видно из всего вышеизложенного, флюксметр Грассо представляет интерес не только как весьма полезный измерительный прибор, но еще и как в высшей степени изящная иллюстрация закона сохранения магнитного потока.

Литература

[1] Grassot, Bull. des séances de la Société de Physique, 1904.

ЯВЛЕНИЕ ТИХОГО РАЗРЯДА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Электричество, № 7, 1910, стр. 185—200

1. Как известно, напряжение между двумя какими-либо проводящими телами, помещенными в воздухе, не может быть поднято произвольно высоко. При достижении определенного в каждом частном случае предела начинается явление тихого разряда, которое распространяется по всей поверхности проводников или сосредоточивается на некоторой части поверхности в зависимости от формы проводников.

Возникновение тихого разряда легко заметить по целому ряду признаков. Так, например, начинается особое характерное шипение — шум. Если опыт производится в темноте, то очень отчетливо можно заметить возникающее при этом свечение поверхности проводников; они как бы обволакиваются ореолом (Штейнмец дал этому свечению название «корона»).

Ясно, конечно, что эти явления представляют собой результат нарушения изолирующей способности воздуха, в обычных условиях очень высокой. Через воздух начинает проходить ток, и при этом появляется некоторая трата энергии, которая не была заметна, пока напряжение не достигло необходимого предела, называемого «критическим напряжением».

При дальнейшем повышении напряжения свечение усиливается, ток через воздух и соответствующая трата энергии очень быстро растут, и, наконец, наступает пробой диэлектрика — воздуха в форме искрового разряда, переходящего в дугу при наличности генератора достаточной мощности.

В современных высоковольтных линиях передачи практика уже подошла к тем условиям, при которых могут появиться тихий разряд и обусловленная им потеря энергии в линии. Таким

образом, пришлось принимать те или иные меры для предупреждения тихого разряда. С этой целью необходимо было составить некоторое представление о зависимости критического напряжения от разных обстоятельств и в этом отношении шли двумя путями. С одной стороны, необходимые для практики цифры были определяемы из непосредственного опыта. С другой стороны, были сделаны попытки осветить вопрос с физической точки зрения и на основании теоретических соображений установить связь между критическим напряжением и условиями, от которых оно зависит.

2. Первое экспериментальное обследование потерь, происходящих от тихого разряда, было произведено Скоттом. Независимо от него Мершон произвел ряд опытов в Теллуриде (Колорадо). Результаты, полученные Скоттом и Мершоном, были доложены Скоттом Американскому институту инженеров-электриков в июне 1898 г. ([6], стр. 118, 155). Скотт и Мершон построили ряд кривых, выражающих зависимость потерь в линии (на тихий разряд) от напряжения между проводами. Все эти кривые характеризуются перегибом, соответствующим критическому напряжению, за которым потери весьма быстро растут. Ниже приведены для примера критические напряжения, полученные из кривых Мершона для следующих условий: диаметр проводов — 4.1 мм, высота барометра — около 550 мм, температура — около 16°.

Расстояние между проводами (в см)	38	56	132
Действующее критическое напряжение (в кв)	38	42	50

При этих напряжениях начинается перегиб на кривых потерь.

3. В 1904 г. появилась работа Рейана, посвященная исследованию вопроса о проводимости атмосферы при высоких напряжениях [5]. В этой работе приведена довольно сложная формула для вычисления критического напряжения. Для проводников, диаметр которых превышает 5 мм, формула Рейана принимает, однако, более простой вид и выражается следующим образом:

$$E_{max} = 54 \frac{H}{273 + t} \left(r + 0.178 \right) \ln \frac{d}{r}.$$

Здесь $E_{max.}$ — амплитуда кривой напряжения в киловольтах, H — барометрическое давление в миллиметрах, t — температура по Цельсию, r — радиус провода в сантиметрах, d — рас-

стояние между проводами в сантиметрах, ln — логарифм натуральный.

Вышеприведенная формула Рейана отличается своими числовыми коэффициентами от оригинальной, в которой H, r и d выражены в дюймах, а t — в градусах Фаренгейта. Ввиду неудобства этих единиц я перечислил коэффициенты соответственно общепринятым единицам.

Выведенная на основании теоретических соображений, формула эта оказалась в согласии с опытами самого Рейана и, по его мнению, вполне согласуется и с результатами опытов Мершона. Последнее, впрочем, едва ли справедливо, ибо несомненно то, что Рейан принял значения критического напряжения из опытов Мершона бóльшие, чем следовало.

Допуская, что кривая напряжения между проводами есть синусоида, нетрудно от $E_{max.}$ перейти к действующему критическому напряжению $E_{кр.}$. Далее Рейан переходит к вопросу о допустимом линейном напряжении между проводами и в качестве первого приближения принимает допустимым действующее рабочее напряжение между проводами в размере $0.9\ E_{кр.}$.

В табл. 1 приведены цифры, вычисленные Рейаном по его формуле для проводов различных диаметров при расстоянии между ними в 122 см (4 фута), при $t = 21°C$ и $H = 750$ мм.

Таблица 1

Диаметр проводов, в мм	$E_{max.}$, т. е. амплитуда кривой напряжения, при которой начинается тихий разряд, в вольтах	Критически действующее напряжение в вольтах (синусоида). $E_{кр.} = \frac{E_{max.}}{\sqrt{2}}$	Допустимое рабочее напряжение, в вольтах $E = 0.9\ E_{кр.}$
1.47	78 500	55 000	50 000
2.69	118 000	83 300	75 000
4.87	157 000	111 100	100 000
10.9	235 500	166 600	150 000
18.0	314 000	222 200	200 000
25.1	392 000	277 700	250 000

В табл. 2 приведены вычисленные мною по формуле Рейана действующие критические напряжения $E_{кр.}$ в киловольтах (при

предположении синусоиды, т. е. $E_{кр.} = \frac{E_{max.}}{\sqrt{2}}$) для $H = 760$ мм и $t = 0°C$, для разных диаметров проводников и расстояний между ними.

Таблица 2

Расстояние между проводами (в см) \ Диаметр проводов (в мм)	5	10	15	20	25	30
50	105	143	180	212	243	(271)
100	118	165	209	250	288	324
200	132	187	236	287	319	378
300	140	200	256	310	361	410

Интересно отметить одно наблюдение, сделанное Рейаном. Он нашел, что момент появления видимого свечения проводов как раз совпадает с началом прохождения тока через воздух, т. е. с моментом появления потерь от тихого разряда. Таким образом, критическое напряжение между проводами можно определить как такое напряжение, при достижении которого начинается видимое в темноте свечение. Рейан на основании опытов пришел к заключению, что этот признак настолько точен и независим от случайностей, что счел возможным предложить новый метод для определения высоких напряжений взамен обычного способа определения по длине искры между остриями.

Действительно, из диаметра проводников, расстояния между ними, барометрического давления и температуры по его формуле можно рассчитать величину того напряжения, при котором наблюдается появление свечения (короны). Именно таким образом мы получим амплитуду кривой напряжения, ибо надо полагать, что появление свечения обусловлено величиной наибольшего значения напряжения. К сожалению, формула Рейана не вполне справедлива. Вообще можно сомневаться, чтобы удалось когда-либо установить совершенно безукоризненно связь между критическим напряжением и разными внешними условиями, и потому трудно рассчитывать на предвычисление критического напряжения с точностью превышающей 5%.

Таким образом, метод измерения высоких напряжений, предлагаемый Рейаном, неприменим. Тем не менее, определение критического напряжения по моменту возникновения свечения проводов, повидимому, справедливо с достаточной для практики степенью точности, хотя и нельзя оспаривать по существу высказанного некоторыми критиками Рейана мнения, что определяемое по наступлению свечения критическое напряжение должно всегда получаться больше истинного, ибо мы заметим глазом явление только тогда, когда оно уже достаточно развилось.

Рейан производил специальные опыты с целью выяснить, не влияет ли на величину критического напряжения, кроме барометрического давления и температуры, еще и влажность воздуха. Оперируя в пределах от 0 до 100% относительной влажности, он не заметил влияния влажности и пришел к заключению, что если это влияние и существует на самом деле, то во всяком случае оно очень мало.

Что касается до частоты того переменного тока, с которым работал Рейан, то, повидимому, он имел 60 пер./сек. По этому поводу интересно указать, что он считает «совершенно невероятным», чтобы частота могла заметно влиять на величину критического напряжения при прочих равных условиях.

4. Автор опытов в Теллуриде, Мершон, возобновил свои экспериментальные исследования на ту же тему и проработал на Ниагаре с 1904 г. до лета 1907 г. Отчет о своих в высшей степени интересных и разнообразных опытах Мершон доложил Американскому институту инженеров-электриков 30 июня 1908 г. [3].

Опытная линия, которая была построена Мершоном, имела в длину 2000 футов (610 м). Вдоль линии были установлены деревянные столбы на расстоянии 140 футов (42.7 м) друг от друга. Сначала провода укреплялись на обычных изоляторах типа *Д*, но затем оказалось, что потери через изоляторы слишком велики по сравнению с потерями на тихий разряд и, главное, весьма изменчивы. Ввиду этого обычно линейные провода подвешивались к поперечинам при помощи парафинированных веревок. Мершон утверждает, что, пока веревки чисты, потери через них ничтожны, и ими можно было пренебречь. Как только поверхность их загрязнялась, они немедленно заменялись свежими.

На опытной линии подвешивались следующие провода:

Материал проводов	Число жил	Диаметр жилы (в мм)	Внешний диаметр провода (в мм)
Алюминий . .	1	2.6	2.6
	1	3.66	3.66
	1	4.72	4.72
	1	5.77	5.77
	19	1.19	5.95
	7	1.99	5.96
	37	0.853	5.97
	7	3.1	9.3
	7	4.4	13.2
Медь	1	2.6	2.6

Для получения высокого напряжения в распоряжении Мершона были два однофазных трансформатора на 10 квт и 100 кв каждый. Из них только один служил для питания линии током высокого напряжения, второй же был использован для того, чтобы исключать автоматически из показаний ваттметра, включенного в первичную цепь рабочего трансформатора, потери в самом трансформаторе.

Схема, примененная Мершоном, весьма остроумна. Придумана она была для того, чтобы решить вопрос об измерении небольших потерь в линии высокого напряжения с достаточной точностью. Мершон, конечно, остановился на измерении мощности в первичной цепи и исключении потерь в самом трансформаторе ввиду отсутствия в настоящее время достаточно практичных ваттметров, приспособленных для работы непосредственно в высоковольтных цепях и притом могущих давать более или менее точные результаты. Однако и метод, примененный Мершоном, не безупречен, о чем будет речь впереди.

Напряжение на линии определялось по вольтметру, приключенному к специальной обмотке трансформатора, независимой от первичной и вторичной. Одним словом, напряжение на линии измерялось при помощи низковольтного вольтметра по коэффициенту трансформации, а не непосредственно у зажимов линии.

Частота изменялась в пределах от 40 до 93 пер./сек. Большинство наблюдений относятся к частоте 73 пер./сек.

Среди целого ряда интересных результатов,к которым пришел Мершон, несомненно наиболее замечательным является

установление зависимости между потерями на линии, происходящими от тихого разряда, и условиями, характеризующими влажность воздуха. Именно Мершон нашел, что при данном диаметре проводов и данном расстоянии между ними потери зависят от особого коэффициента, определяемого условиями влажности и названного им коэффициентом влажности. Этот коэффициент влажности, который мы будем

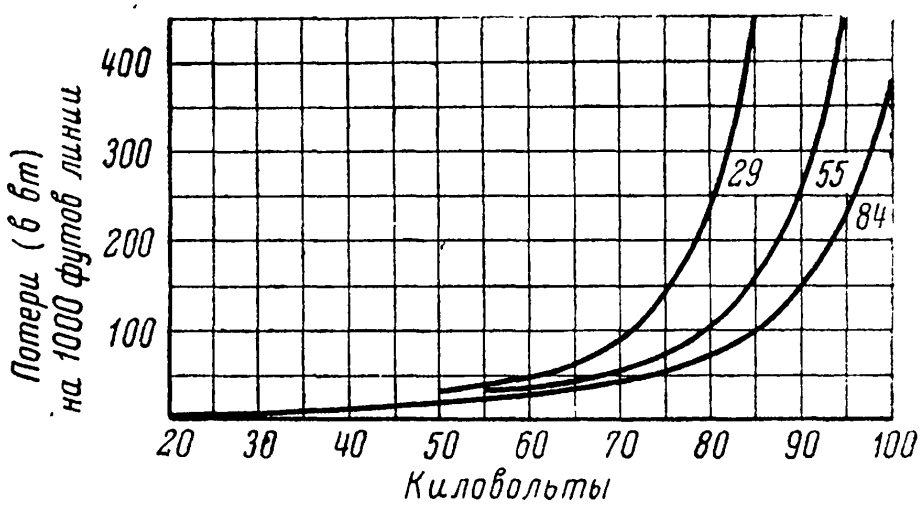


Рис. 1.

обозначать буквой v, представляет собой произведение относительной влажности и упругости водяных паров, заключающихся в воздухе. Так что, если p — упругость водяных паров при некоторой данной температуре t, P — упругость паров, насыщающих пространство при той же температуре, то относительная влажность равна $\frac{p}{P}$ и $v = \frac{p^2}{P}$.

Мершон указывает, что ему редко приходилось иметь дело с коэффициентом v, бóльшим 0.5 дюйма (12.7 мм). Среднее значение v на Ниагаре, по Мершону, есть 0.2 дюйма (5.08 мм). И свои результаты он обычно приводит для этого среднего значения v.

Ниже приведены некоторые из кривых Мершона для общей характеристики результатов, достигнутых им.

На рис. 1 воспроизведены кривые, данные Мершоном для одиночного алюминиевого провода диаметром 4.72 мм, что по шкале, принятой в Америке, соответствует 34600 circular mils. Кривые выражают зависимость между потерями от тихого разряда и линейным напряжением (в действующих киловольтах). Потери отнесены к 1000 футам (304.8 м) линии при следующих расстояниях между центрами проводов: 29 дюймов (73.7 см),

55 дюймов (140 см), 84 дюйма (213 см), частота равнялась 73 пер./сек., коэффициент $v = 0.2$ дюйма (5.08 мм).

На рис. 1 и следующих ясно видно, что кривые потерь по достижении определенного напряжения при дальнейшем его повышении быстро поднимаются кверху в сторону возрастания потерь.

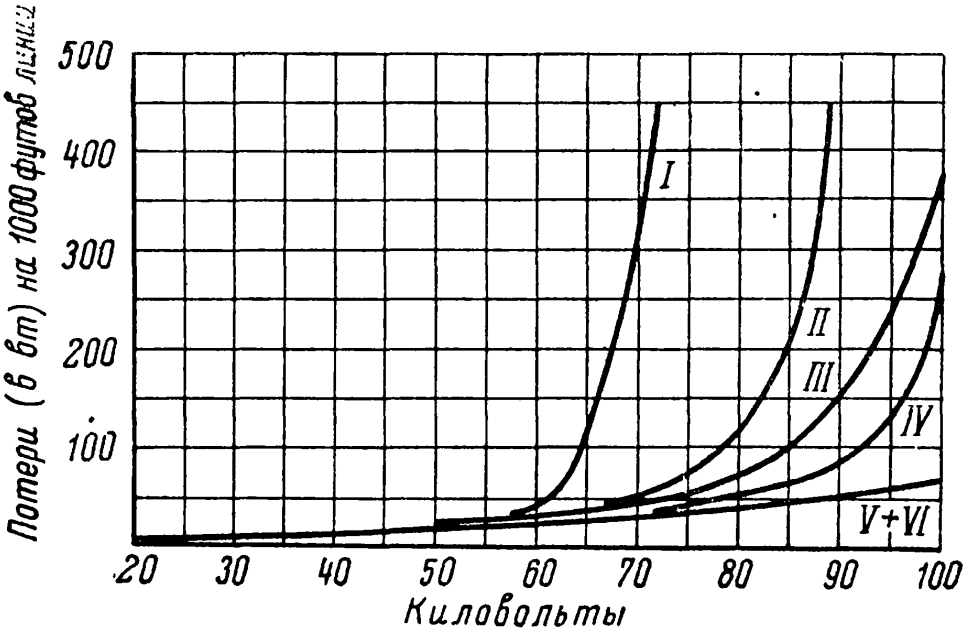


Рис. 2.

На рис. 2 приведены кривые потерь на 1000 футов линии, при $v = 0.2$ дюйма и 73 пер./сек. проводов различных диаметров, расположенных на расстоянии 84 дюйма (213 см) друг от друга.

Кривые относятся к алюминиевым проводам и кабелям следующих диаметров:
I — провод, 2.6 мм;
II—провод, 3.66 мм;
III—провод, 4.72 мм;
IV—кабель, 5.96 мм;
V—кабель, 9,3 мм;
VI—кабель, 13.2 мм.

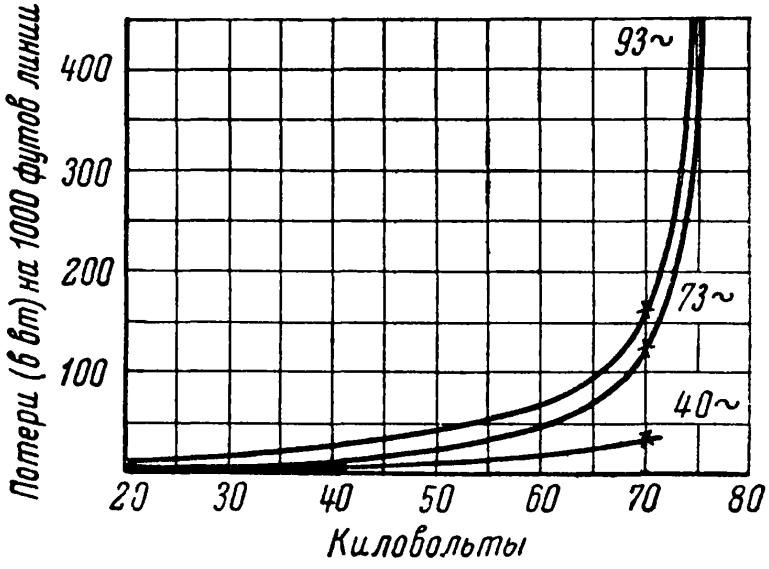


Рис. 3.

На рис. 3 даны кривые потерь для алюминиевого кабеля диаметром в 5.96 мм и с расстоянием между центрами прямого и обратного кабеля в 14.5 дюйма для разных частот. Три кривые соответствуют частотам 40,73 и 93 пер./сек.

На рис. 4 даны кривые, построенные на основании кривых рисунка 3 и выражающие для тех же условий зависимость потерь на тихий разряд от частоты для разных напряжений. Четыре кривые соответствуют напряжениям в 40, 50, 60 и 70 кв.

Зависимости, о которых свидетельствуют кривые рис. 3 и 4, совершенно неожиданны. Это обстоятельство, повидимому, смущало самого Мершона и он в конце концов полагает, что его опыты лишь констатируют факт зависимости петерь от частоты ([3], стр. 888), вопрос же о количественных соотношениях он считает еще открытым. Из исследования формы кривой напряжения выяснилось, что она изменяется при переходе от 40 пер./сек. к 73 и 93 пер./сек. В последних двух случаях (73 и 93) кривые напряжения весьма близки к синусоиде. При частоте же в 40 пер./сек. получается кривая довольно сильно искаженная. Поэтому Мершон вполне справедливо заключает, что сравнимы между собою лишь результаты, полученные для частот 73 и 93.

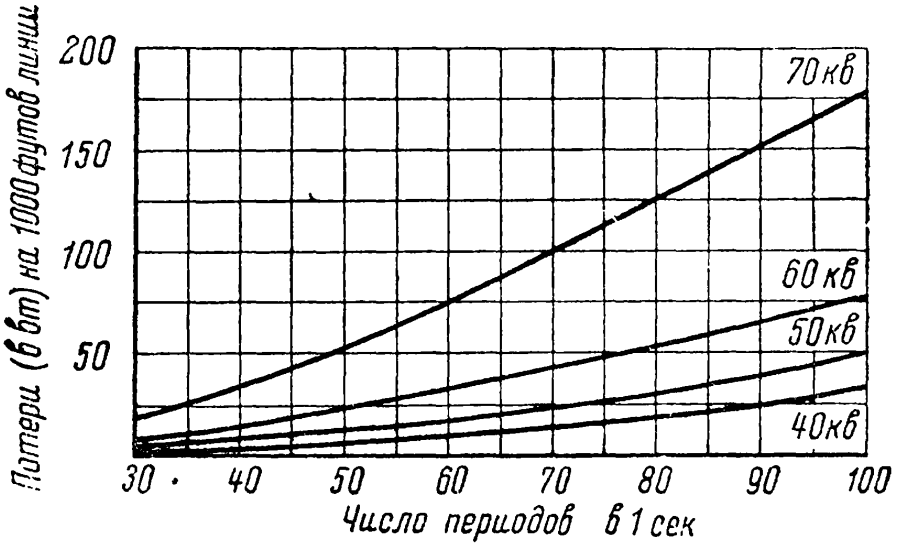


Рис. 4.

Что касается критического напряжения, величину которого так важно знать для практики, то Мершон определял его для различных условий, пользуясь зависимостью потерь от напряжения в этих условиях. Способ определения $E_{кр.}$ был следующий.

Нижняя ветвь кривой потерь продолжалась соответственно характеру этой ветви, насколько об этом можно было судить по виду ее, и определялось напряжение, соответствующее точке, в которой верхняя ветвь кривой отделяется от продолженной нижней. Это напряжение и принималось как критическое, что вполне правильно и вполне отвечает нашему представлению о критическом напряжении.

Получив большое количество значений критического напряжения для разных условий, Мершон построил ряд кривых, выражающих зависимость критического напряжения от ряда обстоятельств.

Из ряда диаграмм, данных Мершоном, я ограничиваюсь одной. На рис. 5 даны кривые, характеризующие зависимость

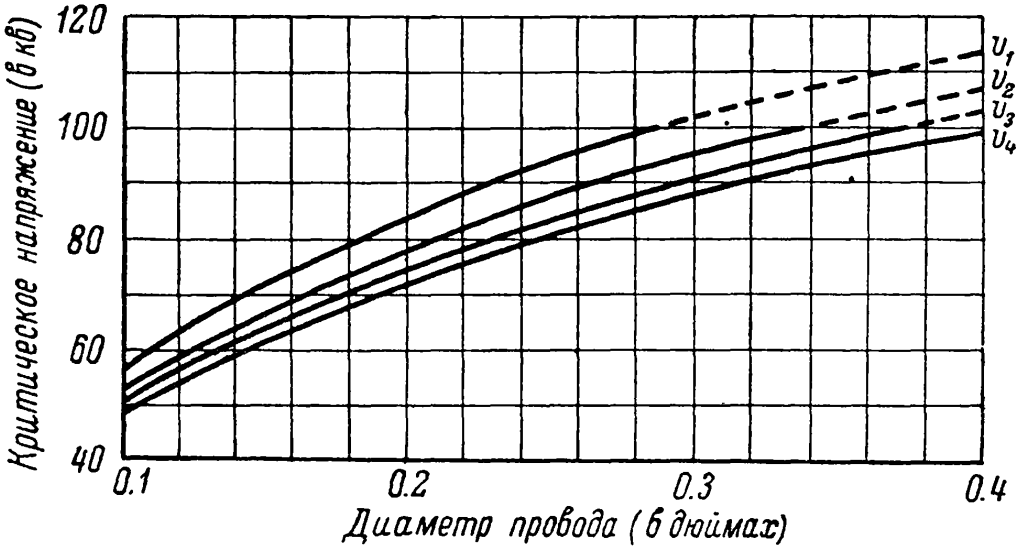


Рис. 5.

между критическим напряжением в киловольтах и диаметром проводов в дюймах. Всего на диаграмме 4 кривые для следующих значений коэффициента v: $v_1 = 0$, $v_2 = 0.2$ дюйма (5.08 мм), $v_3 = 0.4$ дюйма (10.16 мм), $v_4 = 0.6$ дюйма (15.24 мм).

Расстояние между центрами проводов равно 84 дюймам (213 см). Ввиду большого интереса, представляемого опытами Мершона, рис. 1—5 точно воспроизводят диаграммы, приведенные в его докладе.

Величины критических напряжений, полученных Мершоном оказались значительно ниже тех, которые следуют из формулы Рейана. Именно, в среднем они составляют около 60% критических напряжений по Рейану. Ввиду этих разногласий Мершон анализирует формулу и выводы Рейана и некоторые из них признает сомнительными.

На основании своих опытов Мершон дает в качестве первого приближения следующую эмпирическую формулу:

$$E_{кр.} = \left[\frac{1}{1 + K_4 v}\right] \cdot K_1 \left[1 + \frac{K_2}{K_3 + r}\right] r \ln \frac{d}{r} .$$

Здесь K_1, K_2, K_3 и K_4 — постоянные, v — коэффициент влажности, r — радиус провода, d — расстояние между проводами.

В заключение своего доклада Мершон формулирует 22 положения, которые вытекают из опытов в Теллуриде, из работ Рейана и из опытов на Ниагаре. Ниже приведены эти 22 положения.

1) Каждому определенному проводнику, определенному расстоянию и данным атмосферным условиям соответствует определенное «критическое напряжение», при котором появляются весьма заметные потери через атмосферу.

2) Ниже критического напряжения ощутительные потери могут возникать или не возникать в зависимости от атмосферных условий.

3) Присутствие в атмосфере плавающих частиц может вызвать потери ниже критического напряжения (Рейан).

4) Присутствие влажности в атмосфере может вызвать потери ниже критического напряжения.

5) Присутствие влажности в атмосфере влияет на потери как выше, так и ниже критического напряжения.

6) Присутствие в атмосфере влажности или плавающих частиц влияет на положение критической точки (т. е. на величину критического напряжения).

7) Критическое напряжение соответствует частичному разрыву диэлектрика.

8) Критическое напряжение совпадает с тем напряжением, при котором начинается свечение или звучание проводников (или то и другое вместе).

9) Критическое напряжение зависит от максимального значения электродвижущей силы и от расстояния между проводниками.

10) Критическое напряжение зависит от местных значений градиента потенциала или натяжений в диэлектрике — воздухе и, следовательно, обусловливается не только максимальным значением электродвижущей силы и расстоянием между проводниками, но также и диаметром проводников (Рейан).

11) Существуют потери через изоляторы и эти потери зависят от условий влажности атмосферы.

12) Изменение потерь в атмосфере между проводами, изменение потерь через изоляторы и изменение критического напряжения, в зависимости от условий влажности атмосферы, связаны некоторым соотношением с коэффициентом влажности (т. е. произведением упругости паров и относительной влаж-

ности). Соотношение это пока должно рассматриваться как эмпирическое.

13) Потери через изоляторы при тумане значительно выше потерь при сухом воздухе и немного выше потерь при сильном дожде.

14) Чем глаже поверхность проводника, тем меньше потери и тем выше критическое напряжение.

15) Применение кабеля вместо сплошного провода (при том же сечении) уменьшает потери и повышает критическое напряжение вследствие возрастания эквивалентного диаметра провода.

16) Возрастание эквивалентного диаметра провода тем больше, чем больше число отдельных жил.

17) Продолжительное воздействие атмосферных условий на проводники (по крайней мере на алюминиевые, а также, вероятно, и на медные) не увеличивает заметно потерь и не понижает критического напряжения.

18) Потери и критическое напряжение одни и те же для меди и алюминия при одинаковых условиях.

19) Все, что увеличивает заряжающий ток, приходящийся на долю изолятора, увеличивает потери через изолятор.

20) Потери через изолятор на деревянном штыре больше, чем в случае металлического штыря, так как сопротивление деревянного штыря лежит на пути зарядного тока, соответствующего изолятору.

21) Атмосферные потери между проводниками и потери через изоляторы понижаются с уменьшением частоты. Закон этого уменьшения в настоящее время в точности неизвестен.

22) Ни критическое напряжение, ни потери на тихий разряд не зависят от изменения расстояния проводов от поверхности земли.

Влияние плотности воздуха на величину критического напряжения Мершон не включил в вышеприведенные положения. Это он сделал не потому, что сомневался в справедливости данных Рейана по этому вопросу, но просто потому, что это обстоятельство оказалось не замеченным при опытах в Теллуриде и на Ниагаре.

5. В своем президентском обращении к Лондонскому обществу инженеров-электриков 11 ноября 1909 г. ([1], стр. 8) Капп говорит, между прочим, об успехах электрической передачи энергии, упоминает об опытах Мершона и дает собственную более простую формулу для вычисления критического напряжения. Эта формула хорошо согласуется с данными опытов на

Ниагаре и представляет собою результат обработки этих данных. Она дает действующие киловольты и выражается так:

$$E_{кр.} = \frac{0.115\,H}{0.5 + r}\left[\frac{1}{1 + 0.013\sqrt{v}}\right] r \cdot \ln \frac{d}{r}.$$

Здесь H — барометрическое давление в миллиметрах ртутного столба, r — радиус провода в сантиметрах, d — расстояние между центрами проводов в сантиметрах, v — мершоновский коэффициент влажности, равный произведению упругости водяных паров в миллиметрах ртутного столба и относительной влажности.

В табл. 3 приведены вычисленные на основании формулы Каппа значения критических напряжений в действующих киловольтах для разных диаметров проводов и расстояний между ними, подобно табл. 2, в которой приведены цифры по Рейану. При этом было принято $H = 760$ мм, $v = 5$ мм.

Таблица 3

Расстояние между проводами (в см) \ Диаметр проводов (в мм)	5	10	15	20	25	30
50	62.8	82	89.5	92.5	93.7	(93.5)
100	71	94	104	109.5	111.5	112
200	79.3	106	119.5	125.5	128.5	131
300	84	114	128	135	139	141

Если бы при вычислении $E_{кр.}$ по формуле Каппа мы приняли величину v, не равную 5 мм, а иную, то и $E_{кр.}$ изменилось бы. Нетрудно от цифр, приведенных в табл. 3, перейти к случаю какого угодно v. Для этого надо только умножить эти цифры на коэффициент.

$$a = \frac{1.065}{1 + 0.013\sqrt{v}}.$$

Приняв как возможный нижний предел $v = 0$ и как возможный верхний — $v = 25$, получаем $a_0 = 1.065$ при $v = 0$ и $a_{25} = 0.805$ при $v = 25$.

6. Как видно из сравнения табл. 2 и 3, критическое напряжение по Мершону—Каппу значительно меньше того, что дает Рейан.

Причины такого расхождения могут быть двух родов. Во-первых, возможно, что обе формулы приблизительно верно описывают характер зависимости $E_{кр.}$ от разных обстоятельств и дают разноречивые результаты только потому, что числовые коэффициенты в одной из них или в обеих вместе приняты не соответствующими действительности. Во-вторых, возможны разногласия и по существу, если одна из формул в своем основании содержит противоречия с данными опыта. Мне представляется, что причина расхождения чисел табл. 2 и 3 — именно второго рода.

Я думаю, что формула Рейана в общем приблизительно правильно устанавливает характер зависимости между $E_{кр.}$ и диаметром проводов, расстоянием между ними, барометрическим давлением, температурой. Не верны только числовые коэффициенты, в результате чего значения $E_{кр.}$, вычисленные по формуле Рейана, оказываются явно противоречащими данным опыта. Так, например, как видно из табл. 2, при $d = 100$ см и при диаметре в 5 мм $E_{кр.}$ равно, по Рейану, 118 кв, а в действительности при этих условиях свечение проводников совершенно явственно уже при 65 кв. При том же расстоянии и для диаметра провода в 10 мм Рейан дает $E_{кр.} = 165$ кв, а опыт дает 110—120 кв и т. д.

Что же касается формулы Каппа, то, по моему мнению, в ней содержатся противоречия по существу. Совершенно непонятен физический смысл знаменателя $(0.5 + r)$. Благодаря тому, что r входит подобным образом в знаменатель, получается следующий результат.

При неизменном расстоянии между проводами при возрастании диаметра проводов $E_{кр.}$ сначала возрастает, достигает максимума и затем у б ы в а е т. Это сказывается уже при тех значениях диаметра проводов и расстояния между ними, для которых составлена табл. 3. Именно для расстояния в 50 см с возрастанием диаметра мы явно переходим через максимум при диаметре провода в 25 мм.

Для того чтобы резче демонстрировать сказанное о свойствах формулы Каппа, в табл. 4 приведены еще значения вычисленных по этой формуле критических напряжений в киловольтах для расстояний между проводами в 200 и 1000 см, при $H = 760$ и $v = 5$, в зависимости от диаметра.

Это понижение $E_{кр}$ по мере возрастания диаметра проводов, при неизменном расстоянии между ними, в пределах

$$2r \leqslant 0.05d,$$

в одном случае, и

$$2r \leqslant 0.02d,$$

в другом случае — решительно противоречит данным опыта и какой угодно теории.

Таблица 4

Расстояние между проводами (в см) \ Диаметр проводов (в мм)	5	10	15	20	25	30	50	100	150	200
200	79.3	106	119.5	125.5	128.5	131	130	119.5	—	—
1000	98	136	154	164	171	172	177	169	163	156

Тут будет уместно упомянуть, что цифры, вычисленные по формуле Каппа, расходятся с данными опытов, произведенных в электротехнической лаборатории проф. М. А. Шателена (в СПб. политехническом институте). Так, например, из табл. 3 следует, что даже в наиболее благоприятных условиях, т. е. при $v = 0$, трудно подыскать условия для работы с 150 кв. Только при $d = 300$ см и $2r = 30$ мм получаем $E_{кр} = 141 \cdot 1.065 = 150$ кв. Опыт же наш показывает, что даже при расстоянии $d = 100$ см, при диаметре проводов от 20 мм и выше, можно смело работать с напряжениями в 150—160 кв, не наблюдая при этом в темноте никаких свечений, которые могли бы свидетельствовать о наступлении тихого разряда. Еще пример: для кабеля диаметром в 11 мм, по Каппу, $E_{кр} \leqslant 103.5$ кв при $H = 760$ и $d = 100$ см; наш опыт дает в этом случае около 120 кв. Ограничиваемся этими примерами, явно иллюстрирующими ошибочность цифр, вычисленных по формуле Каппа.

Приходится допустить, что те опыты, на основании которых составлена формула Каппа, были в каком-либо отношении не безупречны и потому полученные результаты ошибочны. Их ошибочность не сразу бросается в глаза, пока мы стоим строго в тех условиях, в которых опыты были выполнены. Но как только мы вздумаем воспользоваться установленными зависи-

мостями для того, чтобы обследовать явление при условиях, по существу лишь немного отличающихся в количественном отношении, мы легко можем придти к абсурду. Правда, мы при этом экстраполируем, но ведь качественно условия те же и характер явления остается тем же. Поэтому должно ждать, что, если мы и не получим вполне точных результатов путем экстраполяции, все же логика природы должна сохраниться неизменно, раз только мы исходим из верных опытных данных и имеем дело с явлением, которое несомненно характеризуется непрерывной функцией. Мы, таким образом, не должны получить ни с чем несообразных результатов.

Ведь если бы это было не так, если бы, изменяя условия количественно, а не качественно, мы получали результат, отличающийся по своему качеству в том даже случае, когда по характеру явления нельзя ожидать, что мы имеем дело с разрывными функциями, — всякий прогресс техники был бы немыслим, ибо техника идет вперед, экстраполируя результаты предыдущего опыта.

Итак, мы должны придти к заключению, что те данные, из которых исходил Капп — результаты опытов Мершона — не верны в той или иной части.

Ввиду этого следует обратиться к анализу метода измерений, примененного Мершоном, ибо только в этом отношении и можно ожидать каких-либо указаний.

7. Определение двух величин имело особенное значение в опытах на Ниагаре. Я имею в виду мощность, расходуемую в линии, и напряжение между проводами.

Для получения этих двух величин Мершон прибегнул к непрямому методу измерения. По причинам весьма серьезного свойства (отсутствие готовых, вполне разработанных точных ваттметров и вольтметров для цепей высокого напряжения) Мершон применил особую схему для измерения этих величин в первичной цепи. Именно, как было уже указано выше, напряжение измерялось по коэффициенту трансформации при помощи специальной обмотки в рабочем трансформаторе, а мощность, отданная на линию, определялась как разность между мощностью в первичной цепи и потерями в трансформаторе. При этом разность эта получалась автоматически благодаря применению второго вспомогательного трансформатора, тождественного с рабочим.

Подобный способ определения мощности, отданной на линию, мне кажется не безупречным, ибо весьма сомнительно, чтобы можно было поставить вспомогательный трансформатор

в абсолютно тождественные условия с рабочим. Допустим, например, что в схеме Мершона могут быть достаточно точно исключены потери в сердечнике рабочего трансформатора. Но этого нельзя сказать про потери в диэлектрике трансформатора (масло, бумага и т. д.). А потери эти в трансформаторе на 100 кв отнюдь не ничтожно малы. Они должны достигать по крайней мере десятков ватт и иногда значительно превосходят саму определяемую величину.

Если бы высоковольтные цепи обоих трансформаторов были нагружены тождественно, то, быть может, и потери в диэлектрике достаточно полно скомпенсировались бы в схеме Мершона. Но этого у него не было. Один из трансформаторов не работал, а только держался под напряжением, другой же нагружался на линию, обладавшую емкостью, достаточной для того, чтобы зарядной ток был порядка тока полной нагрузки 10-киловаттного трансформатора. При этом не могло не произойти изменения в распределении электрического поля в рабочем трансформаторе по сравнению со вспомогательным. И, следовательно, потери в диэлектрике едва ли были скомпенсированы в опытах Мершона. Доводы его самого в пользу принятого им метода измерения мощности не достаточны.

На основании приводимой им таблицы мы констатируем факт, что ошибка могла достигать 15—20 вт, в то время как сама измеряемая величина была порядка десятков, порядка одной сотни ватт. Едва ли это характеризует избранный метод с хорошей стороны.

Что же касается измерения напряжения между проводами, то мне кажется, что применение непрямого метода (определение по коэффициенту трансформации) есть самое слабое место в опытах Мершона, так хорошо задуманных и так систематически проведенных. Измерение напряжения в линии есть, пожалуй, самая ответственная часть в опытах, подобных произведенным на Ниагаре. Поэтому в случае применения непрямого метода необходимо иметь во время опытов некоторый контроль над тем, действительно ли показания вольтметра в низковольтной цепи дают нам как раз напряжение между проводами высоковольтной линии.

В докладе Мершона, однако, этот вопрос не затронут и самый метод непрямого определения принимается как несомненно верный. Между тем, как несомненно верно лишь то, что показания вольтметра в цепи низковольтной вспомогательной обмотки могут нам давать величину электродвижущей силы в высоковольтной обмотке. Имеем ли мы, однако, право приравн-

нивать ее к напряжению между проводами, в то время как емкостный ток в линии достигает и даже превосходит величину нормального тока трансформатора, — это еще большой вопрос. И мне кажется, что, принимая во внимание некоторые данные, приводимые в докладе Мершона, приходится ответить на этот вопрос отрицательно.

Именно, есть большая вероятность, что в опытах Мершона напряжение между проводами в действительности было больше того, какое следовало из показаний вольтметра. Повидимому, емкость линии была такова, что создавались условия, благоприятные для резонанса при тех приблизительно частотах, при которых работал Мершон. В пользу такого предположения свидетельствуют опыты Мершона с переменной частотой, результаты которых представлены кривыми на рис. 3 и 4. Правда, сам автор признает, что в этих результатах есть какая то ошибка: «...эти кривые, возможно, ошибочны...» ([3], стр. 867). Но тем не менее это — кривые, построенные на основании данных опыта, и потому мы, критикуя самый метод измерений, имеем полное право основывать свое суждение на этих именно кривых, вид которых бросился в глаза самому автору опытов и которые, по моему мнению, неопровержимо свидетельствуют о резонансе в линии высокого напряжения.

Обратимся к кривым рис. 3 и 4. Будем говорить только о частотах выше 70 пер./сек., ибо, по данным Мершона, только при этих условиях получалась практически неизменная форма кривой электродвижущей силы (близкая к синусоиде). Как видно из рис. 3 и 4, при изменении частоты на 27.5%, т. е. при переходе от 73 к 93 пер./сек., потери в линии возрастают значительно быстрее. Именно: при 40 кв (номинально) потери возрастают на 87%, при 50 кв — на 57%, при 60 кв — на 47%, при 70 кв — на47%.

Такое необычайно быстрое возрастание потерь в линии при сравнительно небольшом возрастании частоты совершенно непонятно, если считать, что при этом напряжение в линии действительно остается неизменным. И, наоборот, все объясняется в высокой степени просто, если признать, что, работая с 73 пер./сек., мы находимся недалеко от условий резонанса. В таком случае небольшое изменение частоты может нас еще более приблизить к полному резонансу напряжений. Ясно, конечно, что напряжение между проводами при этом возрастет, хотя бы вольтметр и свидетельствовал о неизменности электродвижущей силы в высоковольтной цепи. Увеличением напряжения между проводами и объясняется быстрое возрастание

потерь на тихий разряд, кажущимся образом связываемое с изменением частоты. Но если это так, то, следовательно, Мершон, вообще говоря, мог делать значительную ошибку при определении напряжения между проводами.

С целью проверки высказанного мною соображения относительно истинной причины увеличения потерь в зависимости от возрастания частоты, наблюдавшегося в опытах Мершона, в электротехнической лаборатории СПб. политехнического института был произведен следующий опыт (при содействии лаборанта Института инж. А. А. Чернышева).

К зажимам высоковольтного трансформатора была присоединена цепь, которая состояла из сравнительно коротких проводников и заключала в себе электродинамический миллиамперметр и воздушный промежуток, ограничивавшийся двумя металлическими пластинками квадратной формы (27×27 см^2). Одна из этих пластин была гладкая, другая же была усеяна равномерно распределенными остриями в количестве около 500. Все оконечности остриев лежали в одной плоскости, отстоявшей от гладкой пластины на 2 см (приблизительно). При достаточном напряжении между пластинами в промежутке между ними возникает весьма интенсивный тихий разряд (не искры).

Были измерены действующие напряжения между пластинами при силе тока, равной 5 ма, и частотах: 15, 50 и 90 пер./сек. Получены следующие результаты:

Частота	E
15 пер./сек.	10800 в
50 »	11120 »
90 »	11200 »

Емкость того конденсатора, которого обкладками были пластины, гладкая и усеянная остриями, была во всяком случае не более $3.2 \cdot 10^{-5}$ мкф. Безваттный (емкостный) ток имел, следовательно, такие значения при $E = 11000$ в (приблизительно):

Частота	J
15 пер./сек.	$\leqslant 0.000033$ а
50 »	$\leqslant 0.00011$ »
90 »	$\leqslant 0.0002$ »

При таких условиях, очевидно, мы можем совершенно пренебречь безваттной составляющей тока и принять, что во всех случаях ваттная составляющая тока была равна 0.005 а. Отсю-

да нетрудно видеть, что мощности, расходуемые в нашем опыте на тихий разряд, выражались следующим образом:

Частота	E	W
15 пер./сек.	10800 в	54 вт
50 »	11120 »	55.6 »
90 »	11200 »	55 »

Наконец, допуская на узких пределах прямую пропорциональность между током и напряжением, получаем путем пересчета значения мощностей для одного и того же $E = 11000$ в и разных частот:

Частота	W
15 пер./сек.	56 вт
50 »	54.5 »
90 »	54 »

Итак, в описываемом опыте при $E = \text{const}$. потери на тихий разряд оказались практически не зависимыми от частоты, хотя мы изменяли ее не на 27.5%, а на 500%, переходя от 15 к 90 пер./сек. Если, однако, на основании полученных результатов можно говорить о какой-либо зависимости потерь на тихий разряд от частоты, то мы должны будем констатировать факт, даже прямо противоположный тому, что наблюдал Мершон. Именно все происходит так, как будто бы при $E = \text{const}$. и при повышении частоты потери на тихий разряд медленно уменьшаются. По существу это даже более или менее естественно, ибо току тихого разряда должна предшествовать предварительная подготовка — ионизация газа.

Следовательно, чем больше число пульсаций электродвижущей силы в 1 сек., тем больше в общем времени будет затрачиваться на предварительную подготовку газа и тем меньше должен быть средний ток, тем меньшая будет расходоваться мощность.

На основании всего вышеизложенного приходится допустить, что зависимость потерь на тихий разряд от частоты в той форме, как это установлено опытами Мершона, не соответствует действительности и явилась результатом тех осложнений, которые внес резонанс в цепи высокого напряжения. Так как явление резонанса или, вообще говоря, повышения напряжения в линии могло иметь место почти во всех опытах Мершона, то, следовательно, надо относиться с большою осторожностью к величинам напряжений, которые дает Мершон; и если на основании этих опытов и можно выводить какие-либо положения каче-

ственного характера, то во всяком случае никак нельзя устанавливать количественных зависимостей, как это сделал Капп.

Что касается введенного Мершоном коэффициента v, то неуверенность в правильности основных измерений в его опытах заставляет сомневаться и в действительном значении выведенного из опытов коэффициента v. Принципиально, конечно, нельзя отрицать, что критическое напряжение и потери на тихий разряд должны при всех прочих равных условиях зависеть от природы газов, составляющих атмосферу, и, следовательно, влажность не может не влиять. Возникает лишь вопрос, какого порядка это влияние.

Как видно из чертежей, данных Мершоном на стр. 861, 862 своего доклада [3], нельзя сказать, чтобы появление на сцену коэффициента v позволило расположить в достаточно приличном порядке данные отдельных опытов. Особенно справедливо это замечание относительно чертежа на стр. 862, из которого видно, что, например, для 100 кв в некотором случае для одного и того же значения $v = 0.27$ дюйма потери на тихий разряд колеблются от 130 до 204 вт и т. п. Я не могу не сопоставить это с тем фактом, что Мершон совсем не говорит о влиянии температуры на результаты его опытов, между тем как таковое несомненно существует, и на Ниагаре, где годичные колебания температуры возможны в 60°C, критическое напряжение должно изменяться при прочих равных условиях в зависимости от температуры процентов на 25. Этого не мог не заметить Мершон, но мне кажется, что влияние температуры в его обработке опытных данных замаскировалось вследствие введения коэффициента v.

Весьма вероятно, что относительная влажность на Ниагаре колебалась в среднем не слишком много в ту и другую сторону. В таком случае коэффициент v в значительной степени определяется величиною температуры. Он должен быть мал при низких температурах и велик при высоких температурах. В таком случае возможно, что констатированная Мершоном зависимость потерь и критического напряжения от коэффициента v есть в сущности не что иное, как зависимость от температуры*, искаженная к тому же повышением напряжения в линии вследствие резонанса.

Итак, результаты продолжительных опытов Мершона, к сожалению, не вполне точны. Формула Каппа, на них основанная, противоречит данным опыта.

---

* На это обстоятельство обращает внимание и сам Капп ([1], стр. 21).

8. В своей книге «Электрическая энергия» (Нью-Йорк, 1908) Берг дает на стр. 39 следующую формулу:

$$e = \frac{E}{r \log \frac{R}{r}}.$$

Здесь e — максимально допустимый в воздухе градиент потенциала, принимаемый равным 100 кв на дюйм, E — наибольшее значение напряжения между проводом и нейтральной точкой, r — радиус провода (в дюймах), R — половина расстояния между проводами (в дюймах).

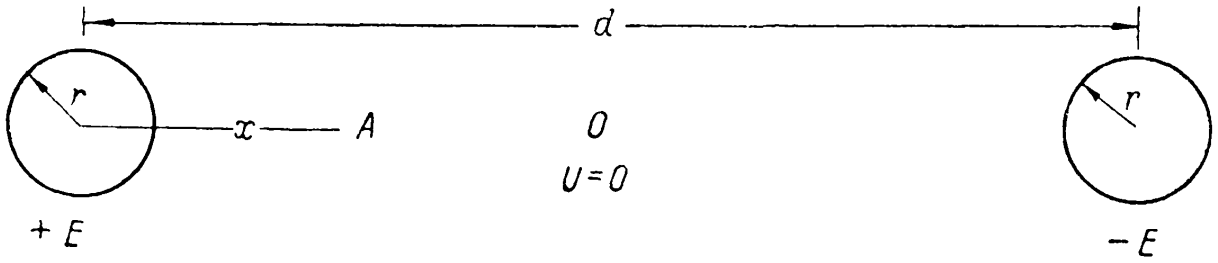


Рис. 6.

Отсюда можно вычислить действующее критическое напряжение между проводами. Именно:

$$E_{\text{кр.}} = E \sqrt{2}.$$

Вычисляемые по формуле Берга значения критического напряжения, хотя и меньше, чем то дает формула Рейана, однако, все же явно превышают величины, получаемые из опыта, и потому мы не будем более останавливаться на формуле Берга.

9. Ниже следует вывод формулы, которая, по моему мнению, дает в первом приближении достаточно точно величину критического напряжения между проводами в зависимости от диаметра проводов, расстояния между ними и других условий. Представим себе (рис. 6) нормальные сечения двух цилиндрических проводников радиуса r. Пусть d — расстояние между центрами. Допустим, что потенциал точки O, лежащей на середине между проводами, равен нулю и в момент, когда разность потенциалов между проводниками достигает наибольшего значения, потенциалы их будут $+E$ и $-E$. Количество электричества, приходящееся при этом на боковую поверхность единицы длины проводника, пусть будет q. Допустим далее, что электричество распределено равномерно на поверхности обоих проводников, что весьма близко к истине при условии

$$d \geqslant 20 \cdot 2r.$$

В этом случае нетрудно выразить электрическую силу F_x в точке A, находящейся на линии центров и отстоящей от оси одного из проводников на расстоянии x. Ясно, конечно, что

$$F_x = F_1 + F_2,$$

где F_1 и F_2 представляют собой составляющие электрической силы, производимые двумя отдельными распределениями электричества (на одном и другом проводе).

На основании теоремы Гаусса имеем

$$F_1 2\pi x = 4\pi q.$$

Откуда

$$F_1 = \frac{2q}{x}.$$

Аналогично

$$F_2 = \frac{2q}{d-x}.$$

Таким образом,

$$F_x = 2q\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x}\right).$$

Отсюда получаем значение потенциала проводника:

$$E = \int_r^{\frac{d}{2}} F_x\, dx = \int_r^{\frac{d}{2}} 2q\left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x}\right] dx = 2q \log \frac{d-r}{r}.$$

Аналогично получаем значение потенциала точки A:

$$U_x = 2q \log \frac{d-x}{x}.$$

Далее,

$$\frac{U_x}{E} = \frac{\log \frac{d-x}{x}}{\log \frac{d-r}{r}},$$

$$U_x = E \frac{\log \frac{d-x}{x}}{\log \frac{d-r}{r}}.$$

Зная U_x можем теперь найти другое выражение для F_x, именно:

$$F_x = -\frac{dU_x}{dx} = \frac{E}{\log\frac{d-r}{r}}\left[\frac{1}{d-x}+\frac{1}{x}\right] = \frac{E}{\log\frac{d-r}{x}}\cdot\frac{1}{r-\frac{x^2}{d}}.$$

Очевидно, наибольшее значение для F получим в случае

$$x = r$$

или

$$x = d - r,$$

что соответствует поверхности того или другого провода. В обоих случаях

$$F_{max.} = \frac{E}{\log\frac{d-r}{r}}\cdot\frac{1}{r-\frac{r^2}{d}}.$$

Откуда

$$U = F_{max.}\left(r-\frac{r^2}{d}\right)\log\frac{d-r}{r}.$$

Приняв для $F_{max.}$ предельное значение, начиная с которого наблюдается весьма сильная ионизация воздуха, обусловливающая возникновение тихого разряда, мы можем из этой формулы вычислить $E'_{кр.}$, т. е. критическое наибольшее значение напряжения между проводом и нейтральной точкой. Наконец, допуская синусоидальную форму кривой напряжения, можем получить действующее напряжение между проводами $E_{кр.}$.

Таким образом,

$$E_{кр.} = E'_{кр.}\sqrt{2}.$$

Что касается предельного значения $F_{max.}$, то, к сожалению, при современном состоянии наших знаний нельзя еще с достаточной точностью установить его величину. Несомненно то, что оно не постоянно и зависит от целого ряда обстоятельств. Наиболее достоверной представляется зависимость $F_{max.}$ от барометрического давления и температуры, установленная целым

рядом опытов [4, 5]. Можно принять, что в тех пределах, в которых мы оперируем,

$$F_{max.} = \frac{a \cdot 273}{760} \cdot \frac{H}{273 + t},$$

где a — значение $F_{max.}$ для нормальных условий температур и давлений, H — барометрическое давление в миллиметрах ртутного столба, t — температура по Цельсию.

Величина a зависит, конечно, от природы газа. В нашем частном случае речь идет о воздухе. Из основных частей его, содержание которых подвержено заметным колебаниям, назовем пары воды, углекислоту, окислы азота, озон. Влияние всех этих примесей изучено еще очень мало. Опыты Мершона, повидимому, дают некоторый материал по вопросу о влиянии влажности на критическое напряжение, но по причинам, выясненным выше, приходится относиться с большой осторожностью к этому материалу и ждать более точно поставленных исследований. Величина a зависит еще, несомненно, от целого ряда других обстоятельств, как то: присутствия в воздухе пыли, дыма (чистота воздуха), актиничности солнечного освещения, вещества проводников и т. д., и т. д. Но опять-таки, одни из этих влияний в силу их малости едва ли могут быть обнаружены в грубом опыте, другие, хотя и более значительны, но изучены пока еще лишь в самых общих чертах. Одним словом, при практическом определении величины критических напряжений приходится впредь до точного выяснения упомянутых выше зависимостей принять a постоянным.

Дж. Дж. Томсон ([7], стр. 13) указывает, что для воздуха при атмосферном давлении градиент потенциала, при котором достигаются условия очень быстрой ионизации воздуха, равен приблизительно 30 кв/см. На основании этого примем $a = 30$ кв/см.

Далее,

$$F_{max.} \frac{30 \cdot 273}{760} \cdot \frac{H}{273+t},$$

$$E'_{кр.} = \frac{30 \cdot 273}{760} \cdot \frac{H}{273+t} \left[r - \frac{r^2}{d} \right] \log \frac{d-r}{r} =$$

$$= \frac{30 \cdot 273}{760 \log e} \cdot \frac{H}{273+t} \left[r - \frac{r^2}{d} \right] \ln \frac{d-r}{r} = 25 \frac{H}{273+t} \left[r - \frac{r^2}{d} \right] \ln \frac{d-r}{r}.$$

И, наконец,

$$E_{\text{кр.}} = 35 \frac{H}{273+t}\left[r - \frac{r^2}{d}\right] \ln \frac{d-r}{r}.$$

Ввиду малости r^2 и r по сравнению с d, можно принять окончательно следующее приближенное соотношение для вычисления действующего критического напряжения между проводами (в киловольтах):

$$E_{\text{кр.}} = 35 \frac{H}{273+t} r \cdot \ln \frac{d}{r}. \qquad (1)$$

Для проверки этой формулы мною было произведено несколько опытов, в которых критическое напряжение, вычисленное на основании этой формулы сравнивалось с напряжением между проводами в момент возникновения свечения проводов при тихом разряде (в темноте). Если принять во внимание трудности определения этого момента и вполне естественное запаздывание глаза в наблюдениях подобного рода, то необходимо придти к заключению, что критическое напряжение, вычисленное, всегда должно быть меньше определенного из опыта. Кроме того, ясно, что величина расхождения должна зависеть от условий, при которых ведется опыт, ибо эти условия могут влиять на способность нашего глаза заметить свечение.

В случае проводов диаметром порядка 1—2 мм, вычисленное критическое напряжение оказывается значительно меньше наблюденного. Это, по всей вероятности, должно быть объяснено тем, что при малом диаметре провода у поверхности его градиент потенциала чрезвычайно быстро изменяется и предельное значение его может быть достигнуто в столь тонком слое воздуха, прилегающего к проводнику, что в момент достижения его световой эффект слишком мал и мы ничего не замечаем глазом. И только тогда, когда, повышая напряжение, мы доведем до предела градиент потенциала и в точках более удаленных от поверхности провода, светиться начнет настолько толстый слой воздуха, что мы его, наконец, заметим.

При диаметре провода миллиметров в 5 и больше получаются уже вполне удовлетворительные совпадения. Так, например, при расстоянии между проводами в 100 см, при $H=758$ мм рт. ст. и $t=15°$, были получены данные, представленные в табл. 5.

Принимая во внимание сказанное выше о трудностях, сопряженных с определением критического напряжения по свечению проводов, должны признать, что цифры последних двух столбцов сходятся достаточно хорошо.

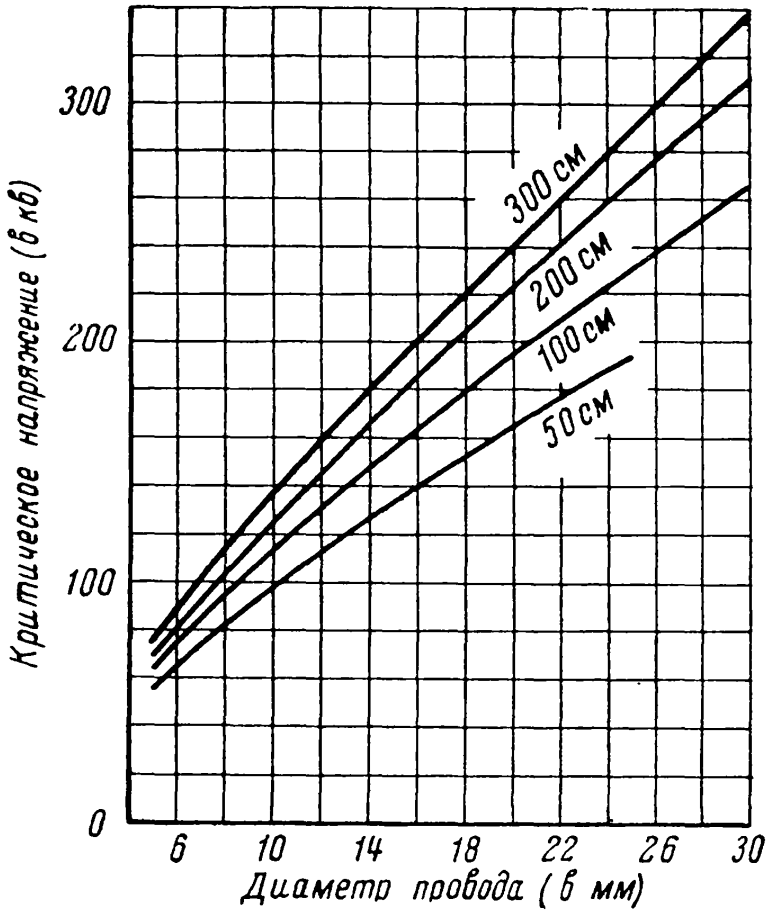


Рис. 7.

Итак, можно констатировать, что для проводов диаметром от 5 мм вышеприведенная формула дает результаты, достаточно согласные с данными опыта в пределах до 150 кв. Есть большая вероятность, что и для высших напряжений должно получиться то же соответствие.

В табл. 6, аналогичной табл. 2 и 3, приведены (в киловольтах) критические напряжения, вычисленные по моей формуле для разных диаметров проводов и расстояний между ними при $H = 760$ мм рт. ст. и $t = 0°$.

На рис. 7—9 даны кривые, построенные на основании моей формулы.

Таблица 5

Род проводника	Диаметр (в мм)	Критическое напряжение (в кв)	
		наблюденное	вычисленное
Кабель железный оцинкованный . .	5	65	60
Кабель медный в 19 жил	11	120—125	115
Трубка латунная	11	125—130	115
Трубка стальная	14.3	145—150	141

Рис. 7 характеризует зависимость между критическим напряжением в киловольтах и диаметром проводов при различных расстояниях между ними (d). Вычерчено всего 4 кривые для случаев d, равного 50, 100, 200 и 300 см.

Рис. 8 дает зависимость между критическим напряжением и расстоянием для диаметров: 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мм.

Наконец, на рис. 9 мы имеем три кривые для критических напряжений в 100, 150 и 200 кв. Эти кривые выражают зависимость расстояния между проводами от их диаметра при одном и том же критическом напряжении.

10. При устройстве электрической передачи энергии диаметр проводов и расстояние между ними должны быть подобраны таким образом, чтобы критическое напряжение более или менее превосходило рабочее напряжение. Если $E_{кр.}$ есть критическое напряжение для данных условий, а E — рабочее напряжение между проводами, то

$$\frac{E_{кр.}}{E} = k$$

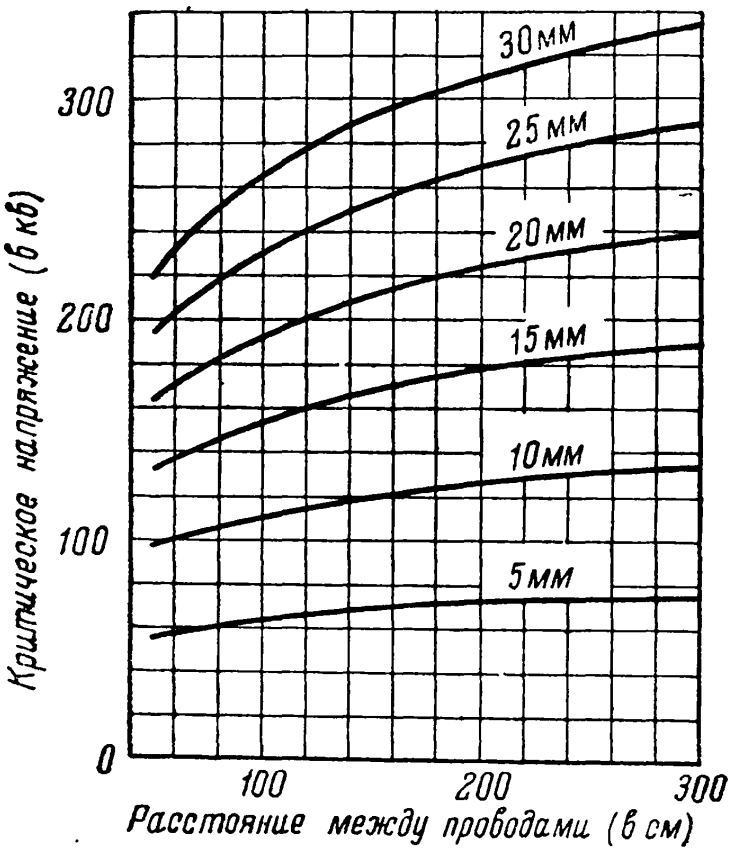


Рис. 8.

есть коэффициент безопасности. В каждом частном случае принимают то или иное значение этого коэффициента в зависимости от обстоятельств. В этом отношении практика еще недостаточно велика, чтобы можно было говорить об установлении

Таблица 6

Расстояние между проводами (в см) \ Диаметр провода (в мм)	5	10	15	20	25	30
50	56	98	135	165	195	(220)
100	63.5	110	155	195	230	270
200	71	125	177	225	270	310
300	75	135	190	240	290	340

каких-либо норм; Рейан, например, в качестве приближения принял (см. табл. 1) $k = 1.11$.

Маршан и Ватсон [2] дают следующие приближенные величины коэффициента безопасности (k): для промышленных районов — от 1.8 до 2, для обычных открытых пространств — 1.5, для пространств с очень чистым воздухом — 1.2.

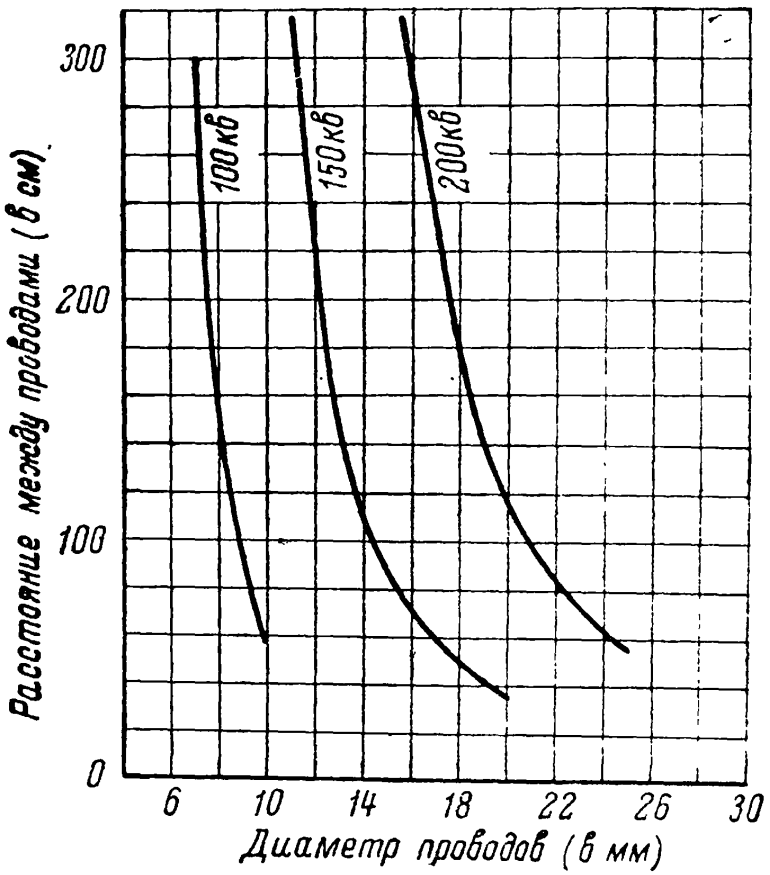


Рис. 9.

В этом отношении интересно привести данные относительно некоторых линий передачи, собранные в табл. 7.

На основании всего предыдущего ясно, что по мере возрастания рабочего напряжения, применяемого на практике приходится прибегать все к бóльшим и бóльшим диаметрам проводов и расстояниям между ними. Что касается расстоянии то в этом отношении вряд ли стоит идти дальше трех

Таблица 7

Установка	Род тока	Диаметр проводов (в мм)	Расстояние между проводами (в см)	Рабочее напряжение (в кв)	$E_{кр.}$ по формуле (1) (в кв)	Коэффициент безопасности
Мутье—Лион	пост.	9	100	57	100	1.75
Керн-Ривер—Лос-Анжелос . .	трех-фазн.	13.7	183	75	156	2.08
Гранд-Рапидо—Маскего . . .		13.7	244	110	165	1.5
Ниагара—Виндзор (строится) .		12	300	110	158	1.44

метров. Дальнейшее увеличение расстояния значительно усложняет устройство опорных приспособлений (башен, столбов) и в то же время мало прибавляет (рис. 8) к величине критического напряжения, так что для напряжений до 200 кв,

по всей вероятности, сохранится расстояние порядка трех метров. В случае же необходимости сделать расстояние между проводами значительно бо́льшим, придется, вероятно, со временем вести каждый провод на особых столбах.

Что же касается диаметров проводов, то в настоящее время они уже доходят почти до 15 мм (13.7 мм). Для увеличения диаметра кабеля при данном сравнительно небольшом сечении провода приходится применять пеньковую основу. Далее, замена меди алюминием дает при том же сопротивлении кабель с бо́льшим внешним диаметром. Подобными средствами удается поднять критическое напряжение достаточно высоко, так что в настоящее время практика (главным образом американская) перешла за 100 кв.

Так, например, рабочее напряжение в 110 кв применено на установке Гранд-Рапидс—Маскегон (Мичиган, США), которая уже работает с 18 июля 1908 г. вполне удовлетворительно ([8], стр. 154; [10], стр. 74). При длине линии в 80 км потери на утечку через изоляторы и на тихий разряд достигают всего 20—25 квт. Так как на линии всего три провода, то на провод-километр приходится от 83 до 104 вт, в среднем потери доходят до 100 вт на провод-километр. Передаваемая мощность равна пока 10 000 квт. Как было указано выше (в табл. 7) на линии Гранд-Рапидс—Маскегон провода отстоят друг от друга на 244 см и диаметр их равен 13.7 мм (медный кабель).

В Америке же строится передача Ниагара—Торонто—Виндзор (Онтарио) с общим протяжением сети до 500 км при рабочем напряжении в 110 кв ([8], стр. 539; [9], стр. 328). Проектируемая мощность — до 40 000 квт. Диаметр алюминиевого кабеля равен 12 мм. Расстояние между проводами равно 300 см.

В Европе в настоящее время проектируется передача 120 000 квт Рона- Париж ([11], стр. 290) на расстояние 450 км, причем предполагается применить не менее 120 кв.

Наконец, в статье Маршана и Ватсона [2] есть указание на проект передачи при помощи рабочего напряжения в 150 кв (Айленд Бар, Грет Вестерн Пауер К°, США). Насколько можно судить по этой статье, в этой установке предполагается допустить коэффициент безопасности, равный 1.11.

Таким образом, приходится констатировать непрерывный рост рабочего напряжения на линиях электрической передачи энергии. Это является, конечно, результатом коммерческой выгоды, достигаемой при повышении напряжения, и в этом отношении очень трудно предсказывать какие-либо границы. Несомненно только то, что применение повышенного рабочего напря-

жения налагает известные условия при выборе диаметра проводов, заставляет увеличивать этот диаметр. Здесь мы, конечно, не можем идти сколь угодно далеко, если только будем держаться обычных типов проводов. Рано или поздно придется выработать такие типы проводов, которые при относительно малом сечении были бы эквивалентны проводам с очень большим диаметром. Одно из многих возможных решений этой задачи состоит в следующем.

Провод составляется из ряда отдельных жил, отстоящих одна от другой и расположенных по некоторой цилиндрической

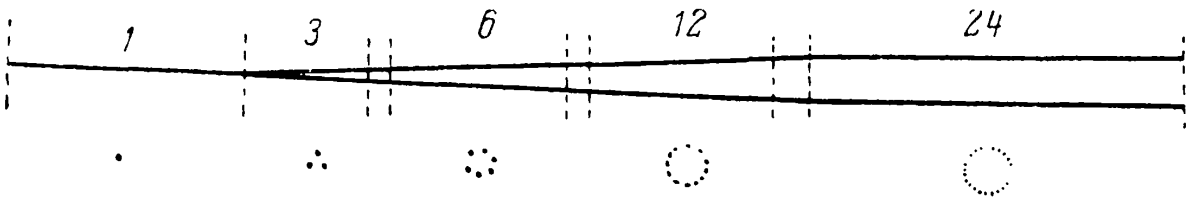


Рис. 10.

поверхности в качестве образующих этой поверхности. Электрическое поле у поверхности каждой жилы будет в этом случае не то, что в случае одной жилы, примененной отдельно в качестве самостоятельного проводника. Должно ожидать, что критическое напряжение для группы жил данного диаметра будет больше, чем для каждой такой жилы в отдельности.

Для экспериментальной проверки этой мысли я при содействии лаборантов СПб. политехнического института инж. Г. А. Люста и инж. А. А. Горева произвел следующий опыт.

Из медных проволок диаметром в 1 мм был приготовлен сложный провод длиною около трех метров. Вначале была 1 проволока, далее она разветвлялась на 3. Еще дальше каждая из этих 3 проволок раздваивалась, так что на третьем участке было всего 6 проволок-жил. Точно так же путем раздваивания на четвертом участке получалось 12 жил и на пятом — 24 жилы. Все эти проволоки натягивались и при помощи особых дисков с зарубинками на окружности все 24 жилы пятого участка располагались по цилиндрической поверхности с диаметром основания, равным 100 мм. Проволоки, конечно, равно отстояли одна от другой. Эта часть образовала нечто вроде удлиненного беличьего колеса. Участки же в 3, 6 и 12 жил сами собою образовывали коническую поверхность благодаря натяжению.

На рис. 10 показаны общие очертания этого сложного провода. Отдельные участки разделены пунктирными линиями.

Цифры над каждым участком дают число отдельных проволок на этом участке. Проводник этот расположен был на расстоянии 100 см от другого провода (кабель в 11 мм диаметром) и между проводами создавалось высокое напряжение. При непрерывном повышении его определялось критическое напряжение для каждой отдельной части сложного проводника. Определение производилось по моменту возникновения свечения. Результаты этого опыта даны в табл. 8, причем для каждого наблюдения дано число проволок и диаметр того круга, по окружности которого равномерно расположены эти проволоки.

При этом необходимо заметить, что, свивая в один кабель 3 проволоки в 1 мм диаметром каждая, мы получили бы провод диаметром около 2 мм, и при расстоянии в 100 см мы имели бы критическое напряжение порядка 40—45 кв. Для 6 проволок свитых в кабель мы получили бы критическое напряжение около 50—55 кв, для 12 — около 60 кв и, наконец, для 24 — около 65—70 кв. Таким образом, ясно, что, раздвигая отдельные жилы, мы увеличиваем при том же сечении величину критического напряжения более чем в 2 раза.

Таблица 8

Число проволок	Диаметр сечения сложного проводника (в мм)	Критическое напряжение (в кв)
1	1	30
3	6	78
3	12	80.5
3	17.5	84
6	27	117
6	35	131
6	46	132
12	50	150
12	>50	>150
24	100	>150

Конечно для того, чтобы практически осуществить подобного рода проводник, необходимо выбрать его конструкцию, т. е. необходимо разработать и проверить на опыте способ сборки такого проводника, способ его подвески и т. д. Все это, однако, не представляет, на мой взгляд, непреоборимых трудностей.

Итак, в заключение можно констатировать, что явление тихого разряда через атмосферу не ставит в настоящее время границ развитию электрической передачи энергии с очень высокими напряжениями. В этом отношении, пожалуй, более серьезные затруднения могут встретиться при конструировании высоковольтных механизмов, питающих линию и получающих энергию от линии.

Все мои опытные исследования, послужившие для проверки вышеприведенных формул и заключений, были произведены в электротехнической лаборатории проф. М. А. Шателена, в Спб. политехническом институте, оборудование которой источниками

токов различного напряжения и частоты, а также измерительными приборами, позволяет исследовать явления в цепях высокого напряжения с достаточно большой полнотой.

Литература

[1] Kapp, Journ. of. the Inst. of El. Eng., 1910, February.
[2] Marchant, Watson, Electrical Review, vol. 65, 1909.
[3] Merchon, Trans. of Am. Inst. of El Eng., vol 27, 1908.
[4] Paschen, Ann. der Physik und Chemie (Wied. Ann.), Bd XXXVII, 1889.
[5] Ryan, Trans. of Am. Inst. El. Eng., vol. 21, 1904.
[6] Scott, Merchon, — E. T. Z., 1899.
[7] Thomson, J. J. Conduction of electricity through gases. Cambrige, 1903.
[8] Electrical World, vol. 53, 1909.
[9] E. T. Z., 1909.
[10] La Houille Blanche, № 3, 1909.
[11] Revue Electrique, t. XI, 1909.

ОПЫТЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД *

Изв. Геол. ком., т. 44, № 5, 1925, стр. 595—621. (Совместно с Левинсоном-Лессингом)

Предметом предлагаемой работы являются опыты, которые мы производили с проф. В. Ф. Миткевичем по его инициативе в его лаборатории в Политехническом Институте. Мысль об этих опытах возникла на почве той магнитной аномалии, которую обнаруживают некоторые изверженные породы карадагского вулканического комплекса в Крыму. Профессор А. В. Вознесенский [2] в течение двух летних периодов производил там исследования этой аномалии и изучал распределение элементов земного магнетизма с геофизической точки зрения. Меня эти полярномагнитные породы, это капризное распределение полюсов на небольшом пространстве заинтересовали с другой точки зрения, именно, с точки зрения возможной связи этой магнитности с составом и структурой этих пород и вместе с тем с точки зрения возможной их причины. Само геологическое строение Карадага исключает возможность искать причины магнитной аномалии в каких-нибудь сильно магнитных массах, находящихся здесь на глубине. О возможной связи с тектоническими элементами не приходится говорить, так как тектоника Карадага еще недостаточно освещена. Никакой определенной связи с какими-нибудь особенностями минералогического состава тоже установить нельзя, по крайней мере, насколько можно судить по беглому пока знакомству с карадагскими породами, исследование которых мною только еще начато. У меня явилось предположение, что эта магнитная аномалия некоторых пород Карадага, быть может, должна быть приписана грозовым разрядам. Я обратился к проф. В. Ф. Миткевичу с таким вопросом: возможно ли остаточное намаг-

* Вводная часть статьи написана Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом. (Прим. ред.).

ничивание горной породы от грозового разряда не только в том случае, когда молния непосредственно ударяет в породу и вызывает образование фульгуритов, но и в том случае, когда разряд происходит по соседству, — и получил от него определенный утвердительный ответ. В процессе обсуждения вопроса о том, как подойти к решению такой задачи, имеем ли мы перед собой остаточную магнитность от земного поля или от магнитного поля грозовых разрядов, и существуют ли какие-нибудь способы различать их, проф. В. Ф. Миткевич высказал мысль, что следовало бы заняться изучением отношения разных горных пород к искусственному намагничиванию, и любезно предложил мне свое сотрудничество. Изложенные в настоящей статье опыты и наблюдения и являются результатом наших совместных опытов, начиная с конца ноября 1924 г. Эти опыты носят ориентировочный предварительный характер. Нами исследовано свыше двухсот образцов горных пород и уже намечаются некоторые выводы; в дальнейшем студент Политехнического института А. А. Турцев будет производить систематическое изучение кривых намагничивания разных минералов и горных пород при помощи особого приспособления, которое придумано проф. Миткевичем. Надо ожидать, что эти опыты дадут систематический материал, столь важный для понимания явлений магнитных аномалий и до сих пор почти совершенно отсутствующий.

Постановка наших опытов и прежние работы в этом направлении

Наши опыты производились в следующей обстановке.

С целью искусственного намагничивания горных пород их подносили к полюсу прямого электромагнита, железный стержень которого имеет в диаметре 50 мм и в длину 400 мм. В условиях нашей работы намагничивание железного стержня током было таково, что сила магнитного поля у самой поверхности полюса доходила до 3500 гс. Во время намагничивания горной породы электрический ток пропускался через обмотку электромагнита, и затем, в тех случаях, когда это допускалось свойствами горной породы, последняя подвергалась ударам деревянного молотка. После этого ток выключался, снова включался, и последовательные включения и выключения производились до 10 раз. Все эти приемы имели целью усилить намагничивание до возможного максимума.

С целью определения магнитного состояния горных пород в их естественном состоянии и после намагничивания, в специально созданных условиях, мы пользовались прежде всего для грубых проб обычным горным компасом, к которому подносили различными частями исследуемую горную породу. Затем в случаях, когда намагничивание горной породы оказывалось сравнительно слабым или не отмечалось горным компасом, мы пользовались чувствительной магнитометрической установкой, состоявшей из магнитной стрелки длиною в 15 мм, подвешенной на бронзовой нити длиною около 500 мм и диаметром в 0.05 мм, и шкалы со зрительной трубой, расположенной на расстоянии в 2.5 м от прикрепленного к стрелке зеркальца. Шкала была снабжена миллиметровыми делениями. Ориентировка магнитной стрелки производилась небольшим постоянным подковообразным магнитом, расположенным под стрелкой на расстоянии в 300 мм. Все подвижные части были, конечно, окружены соответствующими оболочками для защиты от внешних воздействий чисто механического характера.

Для того чтобы можно было судить о порядке чувствительности этой магнитометрической установки, укажем, например, что приближение руки вызывало отклонение, определяемое на шкале в 2—3 мм (объясняется это слабой магнитностью крови). Стрелка горного компаса длиною в 43 мм, расположенная вдоль линии, перпендикулярной направлению стрелки магнитометра, таким образом, что расстояние между центрами стрелок было равно 300 мм, вызывала отклонение по шкале в 40 мм. Подносимый к описываемому магнитометру кусок горной породы обычно располагался по линии, перпендикулярной стрелке магнитометра. При этом расстояние до стрелки доводилось по возможности до минимума. При более или менее значительном намагничивании горной породы, однако, несколько увеличивалось расстояние между куском горной породы и стрелкой. Установить строго определенные условия расположения горной породы относительно стрелки магнитометра не представлялось возможным, так как имевшиеся в нашем распоряжении куски горных пород были самых разнообразных форм и величин.

Таким образом, добытые нами данные, характеризующие степень намагничивания горных пород, должны быть рассматриваемы как величины, определяющие лишь порядок намагничивания. Должно, однако, заметить, что наши определения порядка намагничивания в общем все же представляются не случайными. Их достаточная обоснованность подтверж-

дается рядом повторных и перекрестных наблюдений, приводивших к устойчивым и согласованным результатам.

Как и следовало ожидать, магнитная полярность, сообщенная горной породе от электромагнита, так же прочна, как и полярность, полученная от земного поля (в этом мы имели возможность убедиться неоднократными повторными наблюдениями).

Искусственное намагничивание горных пород производилось, как известно, еще в пятидесятых годах прошлого столетия Меллони, а за ним и Фёрстеманом. Но они задавались целью объяснить намагничивание лав во время застывания в земном магнитном поле и потому изучали намагничивание накаленных горных пород, которые затем или быстро охлаждались, закаливались в воде, или подвергались медленному охлаждению под прикрытием золы или песка. У Фёрстемана есть, правда, и несколько наблюдений над намагничиванием некоторых горных пород от магнита.

Впоследствии Фольгерайтер в Риме повторил опыты Меллони и Фёрстемана в обстановке, которая давала возможность делать точные измерения. Он сравнивал силу естественной магнитности с той, которая получалась в брусьях горных пород после продолжительного накаливания и последующего охлаждения в подвешенном состоянии под действием земного магнитного поля. Во всех случаях наблюдалось более или менее значительное возрастание силы магнитности. Исключение представляют лишь образцы с сильной полярностью, у которых можно констатировать лишь ничтожное изменение. Отсюда автор выводит заключение, к которому, как видно будет из дальнейшего, и мы пришли иным путем и до знакомства с работой Фольгерайтера, что образцы горных пород с резкой полярностью обязаны своим магнетизмом не земному магнитному полю, а другим причинам, если не делать необоснованного предположения, что в период магнетизации этих пород сила земного поля была много значительнее современной ее величины.

Когда наши опыты уже были закончены и мы принялись за изложение их результатов, нам попалась заметка Поккельса, который тоже производил опыты намагничивания искрами от электрической машины, чтобы подтвердить свое предположение о происхождении местных магнитных аномалий на отдельных скалах или горных вершинах от грозовых разрядов. Поккельсом подвергнуто намагничиванию всего 13 образцов изверженных горных пород, в том числе один гнейс. Количество электри-

Опыты намагничивания горных пород и минералов

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
			Глубинные					
1	Сиенит (1)**	—	—					+
2	Дацит (4)	—	—			+		
3	—	Гранит (7)	—					+
4	—	—	Габоро полосатое с Денежк. Камня (8)				+	
5	Гранит (14)	—	—			+		
6	—	—	Киевский лабрадорит (22)				+	
7	—	Пироксенит (77)	—				+	
8	—	Анортозит (89)	—				+	
9	Гранит (90)	—	—			+		
10	Гранит (90)	—	—			+		
11	—	—	Верлит (22)					
12	—	Дунит (94)	—					
13	Хибинит (95)	—	—				+	
14	Бостонит (98)	—	—				+	
15	—	Габбро (101)	—				+	
16	—	Лабрадорит (102)	—		+		+	
17	Форелленштейн (103)	—	—				+	
18	—	Сиенито-диорит (104)	—				+	
19	Сиенит (105)	—	—	+	+		+	

* Сила остаточной магнитности не была определена.

** Цифры, стоящие в скобках, соответствуют номерам, под которыми соответствующие породы значатся в нашем рабочем журнале опытов, в котором записаны некоторые детали,здесь не воспроизведенные.

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
20	Миаскит (106)	—	—			+		
21	Тоналит (107)	—	—		+			
22	Красный финляндский гранит (118)	—	—		+			
23	Серый гранит (119)	—	—		+			
24	Серый гранит (120)	—	—		+			
25	Красный жильный гранит (121)	—	—		+			
26	—	Оливиновое габбро (122)	—				+	
27	Гранитовый порфир (123)	—	—		+			
28	—		Форелленштейн (124)				+	
29	Габбро (125)	—	—			+		
30	—		Пироксенит (126)				+	
31	Лабрадорит (127)	—	—				+	
32	—	Нефелиновый сиенит	—				+	
33	Таврит (141)	—	—		+			
34	Пироксенит (200)	—	—		+			
		Излившиеся						
35	—	Липаритодацит светлый со слюдой (2)	—					+
36	—	Порфирит Ю.-Заозерской дачи (3)	—				+	
37	—	Липаритодацит красный (5)	—					+
38	—	—	Базальт с оливин. жел-вак. (6)				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
39	—	—	Базальт				+	
40	—	—	Базальт				+	
41	Карадагский трасс	—	—	+				
42	—	Трахит (11)	—				+	
43	—	Обсидиан (12)	—				+	
44	Липарит (13)	—	—			+		
45	—	Вулкан. туф, Карагач № 19 на Карадаге (15)	—				+	
46	—	Кв. кератофир, Б. Стена № 46, на Карадаге (16)	—				+	
47	—	Липарит, Хоба-Тепе на Карадаге, 18-с (17)	—				+	
48	—	Андезит, Зеленый овраг на Карадаге (25)	—				+	
49	Карадагский трасс (26)	—	—	+				
50	Липарит Св. Горы (32)	—	—		+			
51	Андезитовый туф (59)	—	—	+?				
52	Порфировый туф (60)	—	—				+	
53	—	Базальт (80)?	—				+	
54	—	—	Базальт (81)				+	
55	—	—	Андезит (82)				+	
56	—	Лейцитофир (83)	—				+	
57	Липаритовая пемза (85)	—	—		+			
58	Липарит (86)	—	—				+	
59	—	—	Базальт (88)				+	
60	Кварцевый порфир (93)	—	—				+	
61	—	Липарит (96)	—				+	
62	—	Дацит (97)	—				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
63	Эгириновый трахит (99)	—	—			+		
64	—	Андезит (100)	—				+	
65	—	Вулканическая бомба (108)	—				+	
66	—	Вулканическая бомба (109)	—				+	
67	—	—	Анамезит (120)				+	
68	Мелафир (130)	—	—			+		
69	Мелафир (131)	—	—				+	
70	—	—	Мелафир (132)				+	
71	—	Базальт (133)	—				+	
72	—	Базальт (134)	—				+	
73	—	—	Авгитовый порфир (135)				+	
74	—	—	Красная лава (136)				+	
75	—	Дацит (137)	—		+?	+?	+	
76	Пемза (138)	—	—					
77	—	—	Трахит (139)				+	
78	—	Трахит (140)	—		+		+	
79	Таврит (141)	—	—					
80	Смоляно каменн. порфир (142)	—	—				+	
81	Смоляной камень (143)	—	—				+	
82	Кварцевый порфир (144)	—	—			+		
83	—	—	Вулканич. бомба (164)					
84	—	—	Вулканич. бомба (165)					
85	—	Шлаковая лава Везувия (166)	—				+	
86	—	—	Базальт (167)					

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
87	—	Мелафир (168)	—					
88	—	Мелафир (169)	—					
89	—	—	Базальт (170)				+	
90	—	Мелафир (171)	—				+	
91	—	—	Мелафир (172)					
92	—	—	Базальт (173)					
93	—	—	Лейцитовый базальт (174)					
94	Андезито-базальт (174)	—	—			+		
95	—	Мелафир (175)	—				+	
96	—	Мелафир (176)	—				+	
97	—	Мелафир (177)	—				+	
98	—	Мелафир (178)	—			+	+	
99	Мелафир (179)	—	—			+		
100	Диабазовый порфирит (195)	—	—		+			
101	Шальштейн (196)	—	—			+		
102	Диабаз (197)	—	—				+	
103	—	Кварцевый порфир (198)	—				+	
104	Вариолит (199)	—	—			+		
105	Пироксенит (200)	—	—		+			
	Метаморфические							
106	Глинистый сланец	—	—	+				
107	Кавказск. кровельн. сланец (24)	—	—	+				
108	—	—	Полевошпатовый амфиболит (29)				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
109	—	—	Тальково-хлоритовый сланец с Лисьей Губы, Карелия (31)				+	
110	—	Змеевик № 91 (39)	—				+	
111	Благородный змеевик (49)	—	—				+	
112	—	Сапролит с Урала (56)	—				+	
113	Глинистый сланец (61)	—	—		+			
114	Гнейс (70)	—	—			+		
115	Гнейс (71)	—	—				+	
116	Гнейс (72)	—	—				+	
117	—	Эклогит (73)	—				+	
118	Тальковый сланец (74)	—	—			+		
119	Гранулит (75)	—	—		+			
120	—	—	Змеевик (76)				+	
121	Гранитовый амфиболит (78)	—	—				+	
122	Амфиболит (79)	—	—				+	
123	Слюдяно-глинистый сланец (145)	—	—	+				
124	Филлит (146)	—	—					
125	—	Змеевик (151)	—				+	
126	—	—	Змеевик (152)				+	
127	Филлит (156)	—	—	+			+	
128	Гнейс (157)	—	—			+		
129	—	Полевошпатовый амфиболит (159)	—				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
130	Полевошпатовый амфиболит (161)	—	—				+	
131	—	—	Полевошпатовый амфиболит (162)				+	
132	Песчаник столбчатый (163)	—	—		+			
133	—	Амфиболит гранато-полевошпатовый (180)	—				+	
134	Полевошпатовый амфиболит (181)	—	—				+	
135	Полевошпатовый амфиболит (182)	—	—	+?	+?			
136	Полевошпатовый амфиболит (183)	—	—		+			
137	—	Благородный змеевик (184)	—				+	
138	—	Змеевик (185)	—				+	
139	—	Змеевик (186)	—				+	
140	—	Змеевик (187)	—				+	
141	—	Змеевик (188)	—				+	
142	Змеевик (189)	—	—			+		
143	Змеевик (190)	—	—				+	
144	—	Змеевик (191)	—				+	
145	—	Змеевик (192)	—				+	
146	—	Гнейс (201)	—				+	
147	Роговообманковый сланец (202)	—	—				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
			Контакты-метаморфические					
148	—	—	Полевошпатовый роговик 26Д (36)				+	
149	Амфиболит (40)	—	—	+?	+?			
150	—	Глинистый роговик (24)	—				+	
151	—	Кордиеритовый роговик (50)	—				+	
152	—	—	Обожженный контактный сланец (63)				+	
153	Известняковый силикатный роговик (65)	—	—	+				
154	Адинол (66)	—	—		+			
155	—	Андалузитовый роговик (67)	—				+	
156	Пятнистый слюдяной сланец (68)	—	—				+	
157	—	Пятнистый глинистый сланец (69)	—				+	
158	Глина обожженная базальтовая (110)	—	—					
159	—	Серая вакка, обожженная леной (111)	—				+	
160	Белый песчаник с конт. призм. отд. (113)	—	—			+		
161	Песчаник обожженный лавой (112)	—	—				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
162	Топазовая контактная порода (114)	—	—		+			
163	—	Известняк с контактн. минерал. (115)	—				+	
164	Турмалиновый роговик (116)	—	—	+				
165	Спилозит (117)	—	—	+				
166	Контактный известняк (153)	—	—				+	
167	Песчаник столбчатый	—	—		+			
		Осадочные						
168	Белый мрамор	—	—	+				
169	Кавказский цеметный известняк	—	—	+				
170	Белый песчаник	—	—	+				
171	Серый кварцит	—	—		+			
172	Уральская полевошпатовая порода (18)	—	—	+				
173	Олигоклаз-альбит с Оленьего о-ва (19)	—	—	+				
174	Белый слабо сцемент. песчаник (20)	—	—	+				
175	Каменноуг. изв. с Prod. (21)	—	—	+				
176	Белый каменноугольн. изв. со Spirifer (23)	—	—	+				

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились*
177	Серый кварцит из окрестн. Москвы (27)	—	—	+				
178	Желтый песчаник с Воробьевых Гор (28)	—	—			+		
179	Синяя глина кембрийская (30)	—	—			+		
180	Кварцит красный (33)	—	—		+			
181	Известняк с Eosoon (34)	—	—		+			
182	Красный ортоклаз с Волкова об-ва (35)	—	—			+		
183	Глауконитовый известняк с Поповки (37)	—	—		+?			
184	Белый полевой шпат с Которонского мыса (38)	—	—	+				
185	Силурийский известняк, Тосна (41)	—	—		+			
186	Рудный кварц (42)	—	—				+	
187	Каолин (45)	—	—			+		
188	Каолин (57)	—	—		+			
189	Мел (58)	—	—	+				
190	—	—	Боксит (62)				+	
191	Каолин (84)	—	—		+			
192	Шокшинский кварцит (147)	—	—		+			
193	Пестрый песчаник (148)	—	—			+		
194	Песчаник (149)	—	—				+	

Продолжение

Порядковый №	Естественное состояние			Отношение к намагничиванию				
	не магнитны	слабо магнитны	сильно магнитны	не намагничиваются	следы намагничивания	слабое намагничивание	сильное намагничивание	намагнитились
195	Древний песчаник (150)	—	—			+		
196	Глина желтоватая (154)	—	—		+			
197	Глина серая (155)	—	—		+			
198	Песчаник слоистый (158)	—	—			+		
199	Мрамор (211)	—	—	+				
			Минералы					
200	—	Асбест в змеевике (44)	—				+	
201	—	—	Оливин с Эйфеля (46)				+	
202	Диопсид (47)	—	—		+			
203	—	—	Лучистый камень (48)				+	
204	Бурый железняк (87)	—	—			+		
205	—	Красн. стеклян. голова (203)	—				+	
206	—	Плотный гемалит (204)	—				+	
207	Бурый железняк (205)	—	—		+			
208	—	Хромистый железняк (206)	Хромистый железняк (206)?				+	
209	Слюда	—	—	+				
210	Горный хрусталь	—	—	+				
211	Молочный кварц	—	—	+				
212	Барит	—	—	+				

чества, соответствующее одному разряду в его опытах, Поккельс определяет приближенно от $\frac{1}{50}$ до $\frac{1}{25}$ кулона, т. е. в 1000 раз меньше грозового разряда. Исследование полярности производилось при помощи буссоли с магнитной стрелкой длиной в 4 см.

Результаты наших опытов

Материалом для наших опытов служили горные породы из коллекции Ленинградского политехнического института. Результаты опытов сопоставлены на приведенной таблице. Остановимся вкратце на сопоставлении полученных нами данных для каждой группы горных пород в отдельности.

Мы называем следами полярности тот случай, когда образец производит отклонение стрелки магнитометра в несколько миллиметров (не более 5); слабой называется полярность, дающая отклонение в несколько десятков миллиметров (не более 50); сильной — когда отклонение превышает 50 мм (во многих случаях оно определяется несколькими сотнями миллиметров или достигает такой величины, что легко улавливается на горном компасе).

Напомним, что образцы всегда подносились к магнитометру вплотную. При сильной полярности образцы действуют на магнитометр иногда уже на довольно большом расстоянии, например, не менее 100 мм и много более, а действие их на горный компас выражается в том, что они легко приводят стрелку компаса во вращательное движение; это — то, что мы отмечаем словами «крутит компас».

Излившиеся породы

Исследовано 64 образца. Бóльшая часть, а именно 68.8%, оказалась намагниченной и лишь меньше одной трети — немагнитными, из коих всего два экземпляра — андезитовый туф и Карадагский трасс — не поддаются намагничиванию.

Все эффузивные породы, которые обладают полярностью (безразлично, слабая ли она или сильная), намагничиваются сильно, часто очень сильно. Сильно намагничивается и половина тех эффузивных пород, которые в природе не намагнитились; остальные намагнитились слабо, а три породы, а именно: белый липарит со Св. Горы на Карадаге в Крыму, пемза и диабазовый порфирит, — обнаружили только следы полярности. Из числа тех, которые слабо намагнитились, обращают на себя внимание эгириновый трахит и ялгубский вариолит.

Интересно отметить сильную естественную полярность у вулканических бомб и у шлаковой лейцитовой лавы Везувия.

Большинство базальтов обнаруживает сильную естественную полярность, как это было известно и из разных предыдущих наблюдений, но странным представляется тот факт, что большинство мелафиров, наоборот, слабо полярны, а некоторые даже вовсе неполярны, хотя все они обладают способностью намагничиваться, и в большинстве случаев сильно, нередко не слабее базальтов. Невольно возникает предположение, не играет ли здесь известную роль древность этих лав.

Необъяснимым является и тот факт, что андезито-базальт из окрестностей Млет, на южном склоне Крестового перевала на Кавказе, лишь очень слабо поддается намагничиванию. Мы его намагничивали трижды: первый раз он дал отклонение всего в 15 мм, второй в 20 мм и третий (в поперечном направлении) в 35 мм.

Глубинные породы

Всего исследовано 34 образца. Лишь менее 3% из них оказались неспособными намагничиваться, все остальные поддаются намагничиванию, хотя, правда, в большинстве случаев в слабой степени. Двадцать экземпляров, т. е. больше половины всего числа (58.9%), оказались не намагниченными в природе, девять экземпляров, т. е. 25.5% — лишь слабо полярными и всего пять, т. е. 14.6%, — сильно полярными. Если принять во внимание, что в числе этих пяти сильно полярных образцов мы имеем известный верлит Франкенштейна, относительно которого весьма вероятно предположение, что он намагничен грозовыми разрядами, а не земным магнитным полем, затем полосатое габбро с Денежкина Камня, богатое титано-магнетитом, и форелленштейн из Вольперсдорфа, относительно которого у нас тоже есть предположение, что он обязан своей сильной полярностью грозовым разрядам, то останутся только киевский лабрадорит и пироксенит из Синих Гор на Урале.

Таким образом, можно сказать, что, вообще говоря, глубинные породы в земном магнитном поле или вовсе не намагничиваются, или приобретают лишь слабую полярность, что, следовательно, условия застывания глубинных пород менее благоприятны для намагничивания, чем условия застывания пород эффузивных.

Обращаясь к искусственному намагничиванию глубинных пород, можно сказать, что те из них, которые приобрели от зем-

ного магнитного поля полярность (все равно — слабую или сильную), все намагничиваются сильно, причем некоторые из них приобретают способность крутить стрелку горного компаса. В этом отношении особенно замечателен один из образцов киевского лабрадорита, у которого была лишь очень слабая полярность, а после намагничивания он стал сильно крутить стрелку компаса.

Что касается тех глубинных пород, которые оказались в природе немагнитными, то большинство из них слабо намагничивается или приобретает лишь следы полярности. Исключением оказались лишь киевский лабрадорит и хибинит, которые намагнитились сильно.

В частности следует отметить, что большинство гранитов немагнитны, но способны намагничиваться.

Контакт-метаморфические породы

Контакт-метаморфические породы в общем сходны с глубинными в том отношении, что бóльшая их часть (55.5%) немагнитны, но большинство, кроме трех: спилозита, турмалинового роговика и известково-силикатного роговика, — обладают способностью намагничиваться. Так как все контакт-метаморфические породы, которые были в природе хотя бы слабо намагничены, обнаруживают способность к сильному намагничиванию, и так как даже некоторые из немагнитных тоже сильно намагничиваются, то следует приписать неблагоприятным условиям охлаждения, аналогичным глубинным породам, то обстоятельство, что они в земном магнитном поле или вовсе не намагнитились, или намагнитились слабо; ведь эти две категории обнимают почти 90% всех контакт-метаморфических пород, и только две, а именно: полевошпатовый роговик и обожженный сланец — обнаружили сильную естественную полярность.

Метаморфические породы

Исследовано 45 образцов, из коих больше половины (61.1%) оказались не магнитными. Сильной полярностью обладают лишь пять пород, а именно: два полевошпатовых амфиболита из Ивреи, которые, быть может, являются настоящими габбро, а не метаморфическими амфиболитами, два змеевика, которые, быть может, тоже являются изверженными породами, и тальково-хлоритовый сланец с Литьей Губы в Карелии, который мы исследовали в виде выпиленных брусьев и который,

следовательно, мог приобрести полярность во время обработки. Контрольный опыт это на самом деле и подтвердил, так как необработанный кусок этой породы оказался лишь слабо полярным (5 мм), но сильно намагнитился (крутит стрелку компаса).

Поэтому можно сказать, что, вообще говоря, в метаморфических породах не встречается случаев сильной полярности, или же они являются исключением. Что касается их отношения к искусственному намагничиванию, то здесь наблюдаются следующие соотношения.

Все породы, получившие в природе хотя бы слабую полярность, сильно намагничиваются. Не поддаются намагничиванию все глинистые сланцы и филлиты, или кровельные сланцы, несмотря на попытки повторного намагничивания, а также два полевошпатовых амфиболита. Этот последний факт особенно замечателен, так как при сравнении микроскопических препаратов оказалось, что не поддающийся намагничиванию амфиболит из Тюрингии содержит значительно больше магнитного железняка, чем другой, который хорошо намагнитился. Еще Меллони и Цаддах отметили, что между магнитностью и содержанием железа или магнетита определенной связи нет и что некоторые породы, более или менее богатые железом, не магнитны.

Ханней приписывал способность к намагничиванию особому силикату железа $Fe_3O_4 \cdot 2SiO_2$, который ему удалось извлечь из некоторых измельченных пород. Этот вопрос требует, конечно, дальнейшего исследования. Точно так же и Делесс, который произвел в 1848—1849 гг. большой ряд исследований над магнетизмом минералов и горных пород, неоднократно подчеркивает, что нет определенной связи между силой магнитности и содержанием железа, что часто минералы и горные породы, более бедные железом, сильнее магнитны, чем более богатые железом, и наоборот. У Делесса имеется, между прочим, несколько указаний, которые сходятся с нашими наблюдениями, например указание на слабую магнитность гранитов, вариолита Дюранса, благородного змеевика, на более слабую магнитность мелафиров по сравнению с базальтами. *

Далее следует отметить, что слабо намагнитились два гнейса, один амфиболит, один тальковый сланец и один змеевик: все остальные породы намагничиваются сильно, некоторые даже очень сильно, так что и здесь приходится говорить о том,

* Силу магнитности Делесс определял взвешивая количества порошка данного минерала или горной породы, который при прочих равных условиях притягивал электромагнит.

что в природе они находились в условиях, для намагничивания не благоприятных.

Особенно интересным представляется сапролит из Южно-Заозерской дачи на Урале. Это какой-то диабазовый порфирит, сохранивший форму дайки и порфировидное сложение, но превращенный целиком в глину и происходящий из шахты в золотоносной серии на глубине, если не ошибаемся, около десяти сажен. В этой породе наблюдаются следы магнитности (на 2—3 мм), но без полярности, а после намагничивания резкая полярность (отклонение ± 25 мм). Очевидно, мы имеем здесь остаточное намагничивание изверженной породы, пережившее ее превращение в глину в виде, так сказать, псевдоморфозы без разрушения формы залегания и структуры горной породы.

Интересно также отметить, что один филлит с характерным шелковистым блеском приобрел полярность, но совсем слабую (10 мм).

Осадочные породы

Осадочные породы представляют совершенно иную картину: они все не магнитны; исключением являются только боксит из Фогельсберга и некоторые тихвинские бокситы. Так как фогельсбергский боксит образовался из базальта, то можно было бы думать, что мы в нем имеем остаточную полярность, унаследованную от базальта, наподобие того, как южно-заозерский сапролит унаследовал свою полярность, вероятно, от того порфирита, из которого он образовался. Этот боксит имеет ясную полярность той категории, которую мы относим к разряду сильной, а после намагничивания крутит стрелку компаса.

Из всех испытанных осадочных пород только четыре песчаника намагнитились сильно, и то относительно сильно; пять приобрели слабую полярность, восемь — лишь следы полярности и восемь совершенно неспособны намагничиваться. Таким образом, можно сказать, что, вообще говоря, осадочные породы не только не намагничиваются в земном поле в силу неблагоприятных для этого условий их образования, но что они в громадном большинстве случаев в силу своего состава и неспособны намагничиваться.

Среди всех осадочных пород совершенно исключительный интерес представляют чистые отмученные каолины: они приобретают при намагничивании совершенно явственную полярность, правда, того порядка, который мы называем следами полярности (в непосредственном соседстве с магнитометром отклоняют его лишь на 2 мм), но все же совершенно опре-

деленную полярность, которая неизменно сохраняется уже в течение нескольких месяцев; так что мы пользовались даже каолином как эталоном для определения степени полярности у других пород, у которых она тоже выражалась в виде следов.

Меллони, а за ним и Фёрстеман утверждали в свое время, что остаточная магнитность может служить отличительным признаком изверженных и контакт-метаморфических пород от осадочных. Это положение, повидимому, может быть нами принято в несколько измененном виде, так как далеко не все изверженные или контакт-метаморфические породы, как указано выше, являются намагниченными в земном поле, а именно: если в горной породе наблюдается не только в особых местах на поверхности, но во всей ее массе, полярность той категории, которую мы приписываем действию земного магнитного поля, то это — порода изверженная или контакт-метаморфическая, хотя бы она и претерпела значительные изменения.

Минералы

Минералы должны составить предмет особого исследования, и нижеследующие данные относятся к более или менее случайному материалу. Намагниченными оказались: красная стеклянная голова, плотный гематит, сплошной хромистый железняк, лучистый камень и зернистые агрегаты оливина с Эйфеля (последние два сильно). Остальные не магнитны и не намагничиваются, за исключением конкрециозного бурого железняка и красного полевого шпата с Волк-острова, которые приобрели слабую полярность. Оливин и хромистый железняк приобретают очень сильную полярность, а красная стеклянная голова и гематит — более слабую, хотя тоже из категории сильной.

Рудный кварц (никкелевый), не магнитный, приобрел полярность ($\pm$20 мм).

Выводы

Таким образом, можно считать установленным нашими опытами, что многочисленные горные породы, по преимуществу изверженные или метаморфические, могут намагничиваться не только в период их охлаждения в земном магнитном поле, но и на холоду в магнитном поле сильного электромагнита, а следовательно, и грозового разряда. И для этого совершенно нет надобности, чтобы молния ударила именно в данную скалу и образовала там фульгуриты. Достаточно грозового разряда по

соседству с данной горной породой, чтобы произвести тот же эффект, который мы получали в лаборатории. Конечно, окончательный эффект намагничивания должен зависеть от характера грозового разряда и, между прочим, от степени затухания возникающих при этом электрических колебаний.

Во всяком случае, если разряд произойдет не только на расстоянии метра или немногих метров, но даже на расстоянии десятков и сотен метров, его эффект может быть такой же, как в наших опытах, если принять во внимание, что один разряд молнии дает до 100 кулонов и может развить в исключительных случаях до миллиона или во всяком случае до нескольких сот тысяч ампер. Даже на расстоянии 1 км сильная молния может создать магнитное поле, примерно равное по силе земному магнитному полю. Поэтому грозы, которые так часто сопровождают вулканические извержения, играют в деле намагничивания лав в период их извержения и застывания, вероятно, гораздо более значительную роль, чем мы привыкли думать, и, быть может, роль более значительную, чем земное магнитное поле.

Итак, остаточная полярная магнитность может быть вызвана у горных пород двумя причинами: земным магнетизмом и грозовыми разрядами. Обыкновенно магнитность горных пород рассматривают только с точки зрения земного магнетизма, между тем, как нам кажется, во многих случаях причину магнитности горных пород надо искать именно в грозовом, а не в земном магнетизме. Естественно задать себе вопрос: существуют ли какие-нибудь признаки, по которым можно отличать магнитность земного происхождения от магнитности атмосферного происхождения? Нам кажется, что ответить на этот вопрос можно утвердительно.

В тех случаях, когда магнитность приурочена к отдельным вершинкам или гребням, когда на небольшом пространстве и в пределах одних и тех же пород наблюдается капризное распределение магнитности (в одних местах она имеется, в других ее нет), когда на небольшом пространстве наблюдаются разные полюса, мы склонны считать, что магнитность здесь вызвана не земным магнетизмом, а атмосферным. Такой вывод делается особенно вероятным, когда наблюдается магнитность в осадочных или метаморфических породах, в которых исключена, надо полагать, возможность намагничивания в земном поле.

Мы идем дальше и полагаем, что в тех случаях, когда наблюдается сильная полярность, носящая характер магнитной аномалии, и притом именно на поверхности или даже на вы-

ступающих частях рельефа, это является признаком атмосферного происхождения магнитности, за исключением, конечно, таких особых случаев, когда это приурочено к массам магнитного железняка или к породам, богатым магнетитом. Нам кажется, что есть даже возможность экспериментальной проверки происхождения постоянной полярности. А именно, некоторые особенности, наблюдавшиеся нами при опытах намагничивания, навели нас на следующую мысль.

Земное магнитное поле слабо и, во всяком случае, во много сотен или даже в несколько тысяч раз слабее того магнитного поля, которым мы пользовались при наших опытах в лаборатории; по сравнению с магнитным полем, которое получается при грозовом разряде в непосредственном соседстве с той или иной горной породой, земное поле является еще более слабым, оно слабее в десятки тысяч раз. Отсюда следует ожидать, что намагничивание от грозового разряда должно быть гораздо сильнее, чем от земного магнитного поля.

Поэтому горные породы, намагнитившиеся в земном поле, хотя в некоторых случаях и сравнительно сильно, являются, так сказать, недомагниченными, не насыщенными магнетизмом; и в сильном магнитном поле они должны домагничиваться. Это явление на самом деле и наблюдается; как видно из вышеприведенных данных, все магнитные горные породы более или менее значительно домагничивались. Обыкновенно при этом наблюдался довольно значительный скачок, например: породы слабо магнитные приобретают способность крутить стрелку горного компаса. Породы, намагниченные грозовыми разрядами, могут быть более или менее насыщены магнетизмом, т. е. уже не способны домагничиваться в нашем лабораторном магнитном поле, которое слабее грозового поля, если разряд происходил в непосредственном соседстве с данной породой.

Несколько опытов в этом направлении было нами произведено, и они, повидимому, подтверждают правильность такого рассуждения. Некоторая затруднительность такого рода опытов заключается в том, что трудно достать достоверный материал для пород с магнитностью заведомо атмосферного происхождения, и, кроме того, такой материал имеет музейное значение и не должен подвергаться опытам, которые могут уничтожить его естественные магнитные свойства, заменив их искусственно полученными. Небольшой материал нам, однако, удалось добыть, а именно: фульгуритовый андезит с вершины Ма-

лого Арарата и несколько магнитных камней с Магнитной Горы в Карадагском вулканическом комплексе (Крым).

Фульгуритовый андезит является особенно ценным, так как в нем сильная полярность совершенно очевидно связана с действием молнии; относительно магнитных камней с Карадага вышеприведенные соображения делают, с нашей точки зрения, весьма вероятным предположение об атмосферном происхождении их полярности. Опыт дал следующий результат.

Фульгуритовый андезит: в естественном состоянии отклонял магнитометр на 40 (быть может, даже на 60 мм), после намагничивания — на 80 мм.

Карадагская лава: сила магнитности возросла приблизительно в три раза, так как камень давал отклонения в 17 мм с расстояния в 10 см, а после намагничивания — с расстояния в 18 см.

Другой кусок Карадагской породы: до намагничивания на расстоянии в 100 см давал отклонение в 13 мм, а после намагничивания в 20 мм.

Фульгуритовый андезит с Арарата: действует на стрелку компаса, в естественном состоянии дает на магнитометре отклонение в 6 мм на расстоянии 250 мм от него, после намагничивания это действие усиливается лишь ничтожно (доходит до 10 мм).

В другом образце этого фульгуритового андезита действие на магнитометр поднимается с 2 мм (тоже на расстоянии 250 мм) до 5. Следовательно, в обоих случаях порядок намагничивания остается тот же, происходит лишь некоторое его упорядочение.

Такой же результат дали и два образца с Магнитного Камня на Карадаге: у одного магнитность, выражающаяся в отклонении стрелки магнитометра на 4 мм на расстоянии 500 мм, не изменилась от намагничивания, у другого более сильное остаточное намагничивание (отклонение в 30 мм на расстоянии 1500 мм) тоже осталось неизменным. Для контроля были испытаны еще два базальта и два образца магнитного железняка, один сплошной, а другой с кристаллами; все они показали очень значительное усиление магнитности после намагничивания.

Очень любопытен опыт с песчаным фульгуритом. Песчаный фульгурит не обнаружил никакого действия на магнитометр. Можно было предположить, что намагничивание, вызванное молнией, было кольцевого характера и потому не давало внешнего эффекта. И действительно, когда мы решились пожертво-

вать одним из фульгуритов и разломили его с одного конца, полюса оказались вскрытыми, и фульгурит обнаружил определенное, хотя, конечно, слабое, полярное действие на магнитометр.

Таким образом, можно считать наше предположение оправдавшимся. Мы имеем, следовательно, в искусственном намагничивании средство отличать остаточное намагничивание грозового происхождения от намагничивания земного поля. Конечно, когда разряды происходили на большом расстоянии, магнитность может оказаться такой же слабой, как и от земного магнитного поля, и в таком случае домагничивание и здесь возможно.

В частности, относительно Карадага у нас на основании этих опытов, в связи с прежними предположениями сложилось представление, что на магнитном Камне (так называемая «Яичница»), на котором имеется несколько резких полюсов, и где горная порода насыщена остаточным магнетизмом, мы имеем дело с магнитностью грозового происхождения. Это, конечно, не исключает того, что в других частях вулканического комплекса Карадага, где имеется лишь слабая магнитность и где породы можно значительно домагнитить, мы имеем полярность лавовых масс, приобретенную ими (во время застывания) от земного магнитного поля.

Таким образом, можно сказать, что и у горных пород, намагниченных грозовыми разрядами, некоторое домагничивание иногда наблюдается, но незначительное, между тем как в породах, получивших полярность от земного поля, сила полярности при намагничивании возрастает не в два-три раза, а в десятки и сотни раз. Да, быть может, и самое увеличение силы полярности в данном случае лишь кажущееся, так как при нашем искусственном намагничивании, так сказать, упорядочивается распределение магнитности, получается два определенных полюса, между тем как до намагничивания распределение магнитности более сложное: повидимому, есть несколько полюсов различной силы.

С этими фактами и заключениями находятся в полном согласии и нижеследующие наблюдения Фольгерайтера.

Он накаливал куски горных пород и затем охлаждал их в подвешенном состоянии, чтобы наблюдать (как и Меллони) явления намагничивания от земного поля, но измерял точно величину отклонения чувствительной магнитной стрелки до искусственного намагничивания и после. Оказалось, что у всех пород слабо намагниченных остаточное намагничивание воз-

растало в три, четыре, двенадцать, четырнадцать раз в исключительных случаях.

Когда же подвергались такого рода исследованию куски лавы с резкой полярностью, т. е. так называемые «puntі distintі», по нашему представлению, следовательно, породы, намагниченные атмосферным электричеством, то наблюдалось лишь самое ничтожное изменение магнитности, на небольшую долю первоначальной ее силы. Автор правильно отмечает, что если бы приписать первоначальное намагничивание этих кусков лавы земному полю, то надо предположить, конечно произвольно, что сила земного магнитного поля в период застывания этих лав в 15 раз превышала силу современного поля.

Подтверждением нашего предположения является и один опыт Андреас и Кёнига, которые изучали известную магнитную верлитовую скалу Франкенштейна. Ими было приготовлено два кубика: один из сильно магнитного, другой из немагнитного, или, вернее, очень слабо магнитного верлита, — и были измерены их магнитные моменты. Затем оба кубика подверглись искусственному намагничиванию сильным электромагнитом. У обоих получилась почти одинаковая величина значительно возросшего магнитного момента, который у немагнитного кубика оказался в 24 раза сильнее, а у магнитного только в три с половиною раза сильнее их первоначальных магнитных моментов. Авторы, правда, из этого никакого вывода не делают.

В истории изучения магнитности горных пород можно отметить следующие этапы, если не считать старых наблюдений Бугэ, Требры, Цаха, Гаюи и Гумбольдта, давших нам первые указания на магнитность некоторых горных пород.

Цаддах считал, что магнитность горных пород связана с присутствием в них магнетита, вызывается колебаниями температуры и зависит от направления господствующих ветров; он считал, что полярность развивается в горных породах лишь на поверхности и с выветриванием, когда магнетит переходит в бурый железняк, прекращается. Этот взгляд, конечно, не имеет в настоящее время значения.

Меллони приписывал полярность у горных пород воздействию земного магнитного поля на изверженные породы в период их застывания и охлаждения и опытами доказал возможность появления магнитной полярности у горных пород в аналогичных условиях охлаждения.

Оддоне и Селла правильно установили, что условия нахождения и распределение полярности в горных породах на обнаженных местах, на вершинах и оголенных гребнях и т. п. гово-

рят против происхождения их от земного магнетизма; у них были на этот счет какие-то предположения, которые они намерены были разработать, а до того не считали возможным высказать, но, насколько нам известно, это ими сделано не было.

Последний этап представляет работа Поккельса, ставшая нам известной уже после того, как наши опыты были произведены. Поккельс приходит к заключению, что полярность, обнаруженная во многих местах в виде так называемой аномалии, должна быть приписана действию грозовых разрядов, и совершенно отрицает возможность намагничивания горных пород в земном поле. Им были произведены опыты пропускания электрических искр через горные породы или по их поверхности, и при этом он наблюдал или появление магнитности у немагнитных пород, или усиление магнитности у тех, которые уже обладали полярностью.

Наши наблюдения и наши опыты доказывают, однако, как нам кажется, что магнитность в горных породах может быть двоякого происхождения: или от земного магнитного поля, или от грозовых разрядов.* Поккельс настаивает на том, что магнитность всегда наблюдается только на поверхностной части горных пород и не наблюдается в более или менее глубоких частях. Однако он сам указывает на один, как он говорит, исключительный случай, а именно, наблюдение Фольгерайтера, который обнаружил полярность на лаве у Виа Аппиа в каменоломне на глубине нескольких метров.

Добавим к этому, что нами обнаружена полярность на сапролите Южно-Заозерской дачи на Урале, происходящем из подземной разработки; примем во внимание, что громадное большинство исследованных нами образцов происходит из коллекций, которые составлялись фирмой Крантца многими сотнями, причем материал добывался в каменоломнях и, конечно, далеко не всегда с поверхности, которая уже давно могла быть уничтожена разработкой; наконец, многие образцы, собранные нами самими или другими лицами, которые доставляли их в Политехнический Институт, заведомо взяты при таких условиях, которые не оправдывают категоричности обобщения Поккельса.

В русской литературе, если не считать переведенных в свое время и помещенных в «Горном журнале» работ Деллеса и Таше, имеется самостоятельная работа Б. П. Кротова [3]. Обнару-

* Напомним, что еще Араго были указаны многочисленные случаи намагничивания судовых компасов, хронометров и других предметов от воздействия молнии [1].

жив в горной группе Наралей, на Урале, магнитность в змеевиках, Кротов исследовал при помощи горного компаса большой ряд змеевиков, перидотитов, габбро и пироксенитов и обнаружил в них разную степень постоянной магнитности. Попутно им был произведен опыт размагничивания и повторного намагничивания одной породы с Наралей при помощи электромагнита. Кротов приходит к заключению, что остаточную магнитность горных пород следует приписать действию земного магнитного поля под влиянием неравномерного охлаждения раскаленных или расплавленных горных пород. Им также затронут вопрос о значении содержания железа в изверженных породах. Предполагая подробнее коснуться этих вопросов в дальнейшем ходе работ, мы ограничимся здесь лишь этим кратким упоминанием.

Таким образом, вопрос о причинах естественной магнитности у многих горных пород отнюдь не может считаться решенным, как это представлялось Меллони и Поккельсу, и, во всяком случае, не в том исключительном направлении, как это было сделано ими.

Итак, магнитная полярность горных пород может быть двоякого происхождения: или от земного магнитного поля, или от атмосферного электричества.

В первом случае мы имеем обыкновенно сравнительно слабую магнитность, во всяком случае не той категории, которая легко обнаруживается горным компасом или буссолью, и такая магнитность присуща лишь изверженным породам и контакт-метаморфическим; в исключительных случаях она наблюдается и в осадочных или метаморфических образованиях, которые могли унаследовать ее от давших им начало изверженных пород. Сюда же относится и магнитность верхних частей многих, особенно базальтовых, лав, поскольку она наблюдается на всей их поверхности, а не приурочена к особым местам с особо сильной магнитной аномалией и резкими полюсами, или «*punti distinti*» Келлера*.

* Вполне допустимо предположение, что поверхность лавы могла намагнититься от гроз, часто сопровождающих извержения. И было бы интересно исследовать куски лавы из разных горизонтов потока; такие исследования были намечены еще Меллони, но не приведены в исполнение. Если наше предположение о намагничивании лавовых потоков во время их застывания и охлаждения от грозовых разрядов верно, то, с этой точки зрения, станет понятным и тот факт, что громадное большинство случаев резких магнитных аномалий, не связанных с железными рудами, наблюдается именно в области эффузивных пород, а также и то обстоятельство, что далеко не всегда, вернее сказать — сравнительно редко, в местах таких аномалий находят фульгуриты.

Во втором случае, когда наблюдается столь сильная полярность, что она в виде определенной магнитной аномалии отражается на горном компасе или на буссоли, когда эта аномалия приурочена к отдельным выступам, скалам, вершинам или гребням, когда на небольшом пространстве имеется несколько различных полюсов, когда полюсы расположены не так, как должно быть при намагничивании от земного поля (т. е. южный полюс наверху, а северный внизу), наконец, когда обладающие такой полярностью куски горных пород не домагничиваются в условиях наших опытов, можно утверждать, что магнитность здесь атмосферного происхождения.

Наши наблюдения и наши опыты показывают, что к вопросу о магнитности горных пород можно подойти с другой и, повидимому, более правильной точки зрения.

Наша работа является лишь первоначальной ориентировочной и рекогносцировочной работой; она намечает необходимость дальнейших систематических исследований, которые, мы надеемся, и будут сделаны; она открывает, как нам кажется, и перспективы для некоторых теоретических обобщений и возможность некоторых практических применений. А принимая во внимание важное теоретическое и практическое значение так называемых магнитных аномалий, нельзя не признать проведение ситематических исследований в намеченном нами направлении, а также и систематического изучения магнитных аномалий в поле весьма желательными.

Нами найден метод распознавания остаточной магнитности грозового происхождения, и нам кажется, что, прежде чем делать те или иные заключения об изменении положения земного магнитного меридиана, необходимо предварительно удостовериться, имеем ли мы дело действительно с намагничиванием от земного поля, или нет. Как известно, еще со времени Меллони считается возможным на основании положения полюсов в лавах и отдельных камнях (южный полюс нормально должен быть наверху, а северный внизу) делать заключение о том, не изменилось ли положение магнитного меридиана, если, конечно, исключена возможность изменения положения самого камня.

В недавно появившейся заметке Меркантон снова к этому возвращается. Из того обстоятельства, что в базальтах Ян Майеан современного возраста положение полюсов правильное, а в третичных базальтах о-ва Диско им найдено иное

расположение полюсов, он делает заключение, что положение магнитного меридиана в третичный период было иное. Но тут остается ведь невыясненным вопрос о происхождении остаточного магнетизма у этих лав, и делается безоговорочное предположение, что оно было вызвано земным магнитным полем.

Литература

[1] Араго Ф. Гром и молния. СПб., 1859.
[2] Вознесенский А. В. Разведочные наблюдения 1922—1923 гг. в области магнитной аномалии на Карадаге в Крыму. Изв. Центр. упр. морск. трансп. за 1922—1925 гг.
[3] Кротов Б., Тр. Казанск. общ. ест., т. XLIV, в. 6, 1912.
[4] Липовский М., Тр. Зап.-Уральск. общ. люб. ест., т. XXXIX, № 1, 1923—1924.
[5] Райхинштейн В., Вестн. физ. наук, №№ 3 и 4, 1918.
[6] Таше, Горн. журн., ч. III, 1858.
[7] Andreae A., König W. Der Magnetstein vom Frankenstein. Senckenberg, Abh. Naturf. Ges., 1888.
[8] Chistoni G., Ufficio Centr. Meteor. Ann., Roma, 1885.
[9] Daubrée A. Géologie expérimentale. Paris, 1879.
[10] Delesse A., Ann. de Chimie et de Phys., t. XXV, 1849; Ann. des Mines, t. XIV, 1848; t. XV, 1849.
[11] Durocher J., Comptes Rendus, t. XLVIII, 1849.
[12] Eschenhagen M., Meteorol. Zeitschrift, Januar, 1890.
[13] Folgherauter G., Rendic. Acc. Lincei, t. IV, 1895.
[14] Fournet J. An. Soc. d'Agricult. de Lion, t. XI, 1848.
[15] Franchi S., Boll. d. Com. Geol., Ital., 1890.
[16] Hannay J., Miner. Mag., t. I, 1877.
[17] Keller F., Rendic. Acc. Lincei, t. II, 1886; t. IV, 1888; t. V, 1889; t. VI, 1890.
[18] Kreil K., Denkschr. der Akademie der Wissensch. in Wien, Bd. 1, 1850.
[19] Meyer O., Naturw. Rundschau, Bd. IV, 1883; Sitz.-Ber. Münch. Akad., Bd. XIX, 1889.
[20] Mercanton P., Bull. Soc. Vaud., t. 1910; Arch. d. Genève, Nov. 1917; Comptes Rendus, t. CLXXIII, 1922.
[21] Montemartini, Rendic. Acc. Lincei, t. IV, 1888.
[22] Naumann E. Nature. 1885.
[23] Naumann E. Bau und Entstehung der Japanischen Inseln. 1885.
[24] Oddone E., Franchi S., Ann. dell' Uff. di Meteorol. e Geodinam., t. XIII, 1890.
[25] Oddone E., Sella A., Rendic. Acc. Lincei, t. VII, 1891.
[26] Pockels F., Neues Jahrb. für Miner., Bd. I, 1897; Ann. der Physik und Chemie (Drude's Ann.), Bd. LXIII, 1897. *

---

* Эта работа попала в наши руки уже тогда, когда наша статья была сверстана, и потому не упомянута в тексте. Эта интересная экспериментальная работа ставила себе целью исследовать на некоторых базальтах зависимость временных и постоянных магнитных моментов от напряжения магнитного поля, а также установить связь между степенью намагничива-

[27] Reich T., Ann. der Physik und Chemie (Pogg. Ann.), Bd. LXXVII, 1849.
[28] Saussure. Voyages, t. IV. 1786.
[29] Zaddac G., Verch. der naturw. Ver. des preuss. Rheinlands und Westphal., Bd. VII, 1851.

ния и содержанием магнетита в базальте и крупностью его зерна. С этой целью из базальтов приготовлялись бруски квадратного сечения, которые подвергались повторному намагничиванию с помощью компенсационной катушки и размагничиванию переменным током. Подробнее эта работа Поккельса будет рассмотрена в работе А. А. Турцева, который в настоящее время занят систематическим экспериментальным изучением магнитных свойств некоторых минералов и горных пород в условиях, аналогичных опытам Поккельса.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НАМАГНИЧИВАНИЯ К ОПРОБОВАНИЮ БУРЫХ ЖЕЛЕЗНЯКОВ

ДАН СССР Л., № 20, 1930, стр. 531—536. (Совместно с Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом и А. А. Турцевым)

В заметке о намагничивании бокситов одним из нас было высказано предположение, что намагничивание могло бы быть применено в качестве метода быстрого полевого опробования как к бокситам, так и к железистым глинам и бурым железнякам. Возможность быстрого определения таким путем содержания окиси железа в бурых железняках представлялась заманчивой задачей, и мы приступили к опытам в этом направлении.

Опыты производились следующим образом:

Испытуемый материал, предварительно измельченный, загружался в стеклянную трубку длиной 12 см, с внутренним диаметром 13 мм, закрываемую с обоих концов пробками. Чтобы получить равномерную плотность по всей длине трубки, наполнение сопровождалось энергичным встряхиванием и затем надавливанием на пробки. Приготовленный таким путем образец подвергался сначала испытанию для установления имеющегося магнитного состояния. Для этого трубка помещалась на столик чувствительного магнитометра в первое гауссовое положение по отношению к системе стрелок, и наблюдения велись посредством трубы и шкалы. После этого образец подвергался искусственному намагничиванию в поле электромагнита и вновь испытывался на магнитометре. Поле электромагнита между плоскими наконечниками стального сердечника, где помещались образцы, доводилось до 2500 гс, и самый процесс намагничивания сопровождался легким сотрясением образца.

Первый ряд опытов с серией бурых железняков, в которых заранее было определено содержание окиси железа, дал отрицательный результат, который мог, казалось бы, совсем нас разочаровать. Дело в том, что бурые железняки оказались до-

вольно индифферентными к намагничиванию, как это уже было установлено нами для двух образцов бурого железняка в одной из предыдущих работ: бурые железняки намагничиваются так слабо (и притом многие из них совершенно одинаково), что пользоваться этим методом для указанной цели не представляется возможным.

Тогда мы прибегли к прокаливанию бурых железняков, для того чтобы превратить водную окись железа в безводную, которая хорошо намагничивается. Принимая во внимание, что существуют две модификации (а быть может, и больше) окиси железа с различными свойствами и что точка перехода одной из них в другую лежит выше 500°, прокаливание бурых железняков производилось при одной и той же температуре 500° (а в ряде случаев даже 400°), после того как контрольными опытами было установлено, что при этих условиях наши бурые железняки отдают практически всю содержащуюся в них воду, как показывают два нижеприведенных примера.

Определения воды в бурых железняках

Образец	Температура	Вода
№ 1/2, Мариуполь	500°	9.68%
	600	9.76
	800	9.80
№ 8, Хоперский район	350	8.65
	450	9.36
	500	9.70
	700	9.79

Прокаленные железняки стали очень энергично реагировать на намагничивание, но вместе с тем оказалось, к нашему огорчению, что никакой пропорциональности между содержанием окиси железа и интенсивностью намагничивания нет (табл. 1 и 2).

Естественно было проверить, не играет ли в этом процессе некоторую роль степень измельчения, которая могла маскировать предполагавшуюся нами пропорциональность. Поэтому из нескольких бурых железняков было приготовлено по несколько проб различной степени измельчения. Как показывает табл. 3, степень измельчения действительно играет большую роль: чем мельче измельчено вещество, тем сильнее намагничивание, и притом наиболее мелкие фракции намагничиваются значительно сильнее фракций более крупного измельчения.

Таблица 1

Сопоставление намагничивания бурых железняков в естественном состоянии и после прокаливания

	Керченский п-ов								
	Красный Кут					Чугунка			
	№ 150	№ 151	№ 152	№ 153	№ 154	№ 181	№ 182	№ 183	№ 184
Содержание Fe_2O_3 (в %)	42.82	51.49	60.11	32.97	65.31	60.31	59.79	42.25	49.61
Намагничивание в естественном состоянии . .	±16	±4	±5	±10	±5	±6	±5	±8	±6
Намагничивание после прокаливания	±20	±17	±12	±18	±132	±42	±18	±20	±215

Таблица 2

Магнитность различных бурых железняков (прокаленных)

	Происхождение руды									
	Мариупольский район		Сулинское месторождение		Сметанинский рудник	Мелитопольский район	Хоперский район		Синячихинский рудник	Ветлужский район
Содержание Fe_2O_3 (в %)	58.91	39.65	37.40	77.95	71.25	75.64	64.30	84.01	80.60	51.74
Магнитность в естественном состоянии . .	0	0	0	0	0	0	0	0	0	±12
Магнитность после намагничивания . .	±27	±40	±110	±35	±950	±320	±15	±1100	±425	

Но когда опыты с прокаленными бурыми железняками были повторены при условии совершенно одинакового измельчения всех образцов, оказалось, что пропорциональности все-таки нет, хотя скачки и были несколько менее значительны, чем в первой серии опытов, когда степень измельчения не принималась во внимание. Могло возникнуть сомнение в правильности нашего исходного предположения, что должна существовать пропорциональность между содержанием окиси железа и интенсивностью остаточного магнетизма.

Таблица 3

Зависимость между намагничиванием и степенью измельчения

Происхождение руды	Степень измельчения	Магнитность		
		в естественном состоянии	после намагничивания	после вторичного намагничивания
Сулинское месторождение (обр. № 2)	Самая крупная фракция . . .	0	0	± 25
	Более мелкая фракция . . .	0	± 35	
	Средняя фракция	0	± 30	
	Самая мелкая фракция . . .	0	±140	±160
Синячихинский рудник, Алапаевского округа	Крупная фракция	0	± 77	
	Самая мелкая фракция . . .	0	±300	

Для проверки или устранения этого сомнения было приготовлено несколько смесей из чистой прокаленной окиси железа и мела в качестве индифферентного вещества. Так как все эти смеси были приготовлены из одного и того же порошка, то, следовательно, они все были одинаковой степени измельчения. Как показывает нижеприведенная табличка, получилась полная и прямая пропорциональность: линия, изображающая эту зависимость, является прямой линией с ничтожным от нее уклонением, которое, очевидно, лежит в пределах точности наших опытов.

Намагничивание смесей искусственной безводной окиси железа и мела

Состав смеси (в %)						
Fe_2O_3 . . .	100	75	50	25	0
$CaCO_3$ . . .	—	25	50	75	100
Отклонение стрелки магнитометра	±395	±330	±258	±120	0

Эти контрольные опыты с определенностью указывали на то, что причину уклонения естественных бурых железняков от искомой пропорциональности следует, очевидно, искать в примесях, которыми более или менее богаты все бурые железняки. Конечно, ни кремнекислота, ни кальцит или иные примеси этого рода, как вещества в магнитном отношении индифферентные, не могут быть причиной аномальных отклонений.

Прежде всего надлежало поэтому выяснить, не играет ли тут роль закись железа. Анализ показал, что большинство бурых железняков закиси железа не содержит, некоторые содержат ее в ничтожных количествах; но вместе с тем было обна-

ружено, что один из бурых железняков, а именно ветлужский, который дал аномально резкое по сравнению с другими намагничивание, содержит 5.70% FeO. Если эта закись железа входит в состав магнитной окиси железа, то аномально сильная магнитность этого железняка становится понятной.

Бурый железняк ветлужский

(Аналитик В. А. Егоров)

	%	Молекулярные количества
SiO_2	8.25	0.1374
Al_2O_3	3.22	0.0316
Fe_2O_3	51.74	0.3233
FeO	5.70	0.0792
CaO	12.23	0.2184
MgO	4.60	0.1150
Na O	не опред.	
K_2O	не опред.	
(H_2O) (потеря при прокаливании)	4.34	0.2411
TiO_2	0.27	0 0034
MnO	2.13	0.0296
CO_2	7.34	0.1668
SO_2	0.12	0.0015
P_2O_5	0.27	0.0019
	$\Sigma = 100.21$	

Итак, в некоторых случаях аномально сильное для прокаленных бурых железняков намагничивание объясняется содержанием в них закиси железа, т. е., вероятно, некоторого количества магнитной окиси. Но остаются все остальные железняки, не содержащие закиси железа. Какова в них причина пертурбации в магнитных свойствах?

Мы обратились к марганцу, и, когда было сделано определение марганца в некоторых из керченских бурых железняков и их остаточное намагничивание было сопоставлено с ним, сразу получилась ясная картина. Содержание марганца отражается на магнитности совершенно определенно: чем больше марганца, тем сильнее магнитность (табл. 4). Сопоставление нескольких образцов из одного и того же месторождения в Керченском районе показывает, что два образца с одинаковым содержанием марганца дают одинаковую остаточную магнитность: образец, в котором содержание марганца в 2.5 раза больше, чем в другом, дает магнитность в 2.4 раза больше. Если марганца во много раз больше, то и магнитность во много раз, хотя и не в этой же именно пропорции, превышает магнитность другого образца.

Таблица 4

Зависимость остаточной магнитности от содержания марганца

Содержание %	Керченский п-ов						
	Красный Кут			Чугунка			
	№ 150	№ 152	№ 154	№ 181	№ 182	№ 183	№ 184
Fe_2O_3	—	—	—	60.31	59.79	42.25	49.61
FeO	нет	нет	нет	нет	нет	0.21	нет
MnO	0.38	0.51	0.07	0.59	0.23	0.23	4.29
H_2O при 400°	—	—	—	15.35	14.94	14.65	15.36
Отклонение стрелки магнитометра	±163	±360	±60	±42	±18	±20	±215

У образцов №№ 152 и 153 содержание MnO (в сотых %) и магнитность дают отношение 1 : 7.5 и 1 : 10; № 150 уклоняется от линейной пропорциональности.

Чтобы установить характер зависимости (простая пропорциональность или более сложная зависимость?), необходимы еще дальнейшие опыты. Для выяснения вопроса о том, в каком виде находится марганец в этих бурых железняках, в виде закиси или окиси, не образует ли он с окисью железа соединения типа магнитного железняка или, вообще говоря, шпинели, в Петрографическом институте АН СССР будет произведено соответствующее исследование.

Но из приведенных здесь опытов вытекает уже и теперь два вывода, заслуживающих внимания. Во-первых, в научном отношении интересно констатировать, что остаточное намагничивание прокаленных бурых железняков находится в связи с содержанием в них марганца, и, во-вторых, этот вывод имеет значение и в практическом отношении, так как, очевидно, можно рекомендовать намагничивание одинаково прокаленных и одинаково измельченных бурых железняков, в пределах одного и того же месторождения, как метод быстрого полевого опробования бурых железняков на марганец. Этим методом можно быстро, не производя химического анализа, определить, содержит ли данная руда доли процента, процент, несколько или много процентов марганца, а быть может, даже и с большей точностью производить сортировку таких бурых железняков по содержанию в них марганца.

К ВОПРОСУ О ПРАКТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ЕДИНИЦАХ

Сборник Ленинград. электромех. инст., в. 2. Изд. КУБУЧ, Л., 1933, стр. 26—32

1. Международный Электротехнический Конгресс, имевший место в Париже в 1900 г., после длительного предварительного обсуждения вопроса о наименовании магнитных единиц, установил две магнитные единицы: «максвелл» и «гаусс». Максвеллом была названа абсолютная электромагнитная единица магнитного потока.

Что же касается наименования «гаусс», то в отношении его произошло недоразумение, вследствие ошибочной несогласованности английского и французского текстов материалов, к этому делу относящихся. В результате одни страны поняли постановление конгресса 1900 г. в том смысле, что гауссом названа абсолютная электромагнитная единица магнитной индукции, другие считали, что гауссом названа абсолютная электромагнитная единица магнитной силы, наконец, третьи не без основания приняли наименование «гаусс» для абсолютных электромагнитных единиц и магнитной индукции и магнитной силы.

Дело в том, что в оригинальном максвелловском построении абсолютной электромагнитной системы единиц магнитная проницаемость является простым коэффициентом, не имеющим никакой физической размерности. Таким образом, физическая размерность магнитной индукции и магнитной силы оказывается одною и тою же, и поэтому казалось логичным, чтобы и наименования единиц этих двух величин были тождественны, подобно тому, что принято для электрического потенциала и электродвижущей силы, имеющих одну и ту же физическую размерность. В связи с вышеизложенным совершенно естественно, что вскоре обнаружилась несогласованность в отношении наименования единиц магнитной индукции и магнитной силы у различных авторов, писавших на различных языках.

Проистекающие от этого неудобства были, наконец, ясно осознаны, и во время пленарного собрания Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) в Белладжио в 1927 г. постановлено изучить этот вопрос всесторонне и окончательно решить его в том или другом смысле во время следующего пленарного собрания МЭК, которое было назначено на 1930 г. в Скандинавии. Для предварительной проработки вопроса о магнитных единицах была создана специальная подкомиссия в составе семи человек — представителей Великобритании, Германии, Голландии, Италии, САСШ, СССР и Франции. Этой же подкомиссии было поручено также и подготовить материалы по вопросу о наименовании практической электромагнитной единицы магнитного потока и других магнитных величин. Последний вопрос был возбужден по инициативе представителей Италии и поддержан представителями других стран.

2. В 1930 г. во время пленарного собрания МЭК в Скандинавии было прежде всего принято принципиальное постановление считать магнитную проницаемость величиной, имеющей физическую размерность. Таким образом предрешался вопрос о различных наименованиях для единиц магнитной индукции и магнитной силы. В результате длительного обсуждения вопроса о магнитных единицах были приняты затем следующие наименования а б с о л ю т н ы х э л е к т р о м а г н и т н ы х е д и н и ц:

максвелл — единица магнитного потока;
гаусс — » магнитной индукции;
эрстед — » магнитной силы;
гильберт — » магнитодвижущей силы.

После этого было установлено наименование «прамаксвелл» для обозначения п р а к т и ч е с к о й единицы магнитного потока, равной 10^8 максвеллов. Что касается других практических магнитных единиц, то вопрос о распространении на них приставки «пра» (первого слога слова *practical, practique* — практический) оставлен пока открытым. Причина этого кроется главным образом в том, что только в отношении практической единицы магнитного потока дело было бесспорно. Именно, для всех было ясно, что практическая единица магнитного потока должна быть подобрана таким образом, чтобы устранялся коэффициент, равный 10^8, в основном соотношении между вольтом и единицей магнитного потока. Приняв прамаксвелл в вышеуказанном смысле, мы получаем:

вольт = прамаксвелл в секунду

Далеко не так просто обстоит дело в отношении других практических магнитных единиц. Существует целый ряд возможностей в выборе тех величин, которые по тем или иным соображениям могут оказаться удобными в качестве практических единиц магнитодвижущей силы, силы магнитного поля и т. д. Несомненно, прежде чем остановиться на чем-либо определенном, следует принять во внимание указанное обстоятельство и выбрать то, что будет наиболее подходящим. Таким образом, дальнейшая проработка вопроса о практических магнитных единицах была отложена до пленарного собрания МЭК в 1934 г., местом которого намечена Прага.

В сентябре 1931 г. в Лондоне, в связи с международным съездом прадставителей электротехнического мира для чествования памяти Фарадея по случаю столетия открытия электромагнитной индукции, было организовано собрание подкомиссий МЭК по магнитным единицам с целью предварительного обсуждения вопроса о практических магнитных единицах. Однако вследствие обнаружившихся разногласий собрание не пришло ни к какому определенному решению. В июле 1932 г. во время Международного Электротехнического Конгресса в Париже был также отчасти затронут вопрос о магнитных единицах, но и в этом случае ничего существенного не было сделано в отношении практических магнитных единиц.

З. Е. Брилинский, вице-президент МЭК, президент Французского электротехнического комитета, принимавший личное участие в трудах Скандинавского пленарного собрания МЭК, высказывает следующие соображения по вопросу о практических магнитных единицах, которые можно было бы установить в дополнение к прамаксвеллу[3]. Именно он полагает, что никаких недоразумений не произойдет, если наименования «прагаусс», «праэрстед» и «прагильберт» присвоить практическим магнитным единицам, произведенным от соответствующих единиц CGS путем принятия за единицу длины квадранта, т. е. 10^9 см. В этом случае мы шли бы по тому же пути, что и при установлении практических электрических единиц (вольт, ом, ампер и т. д.).

Таким образом, получается: 1 прамаксвелл = 10^8 максвеллов, 1 праэрстед = 10^{-10} эрстедов, 1 прагаус = 10^{-10} гауссов, 1 прагильберт = 10^{-1} гильбертов.

Как ни заманчиво предложение Е. Брилинского, сводящееся к тому, чтобы выдержать единообразие в построении системы практических электрических и магнитных единиц, я думаю, однако, что прагаусс и праэрстед (в указанном выше смысле)

едва ли могут найти какое-либо применение по причине чрезвычайной своей малости. Ведь в области динамостроения, которую мы можем по всей справедливости рассматривать как пример области, особенно нуждающейся в установлении практических магнитных единиц, мы встречаемся с магнитной индукцией порядка 10^4 гауссов и с магнитной силой порядка нескольких десятков эрстедов.

В то же время квадрант как единица длины совершенно непригоден для практики и, конечно, никогда не будет применяться для связи магнитной силы с магнитодвижущей силой. Ввиду изложенного я полагаю, что указанная система практических магнитных единиц, намеченная Е. Брилинским, не является такой, на которой следует окончательно остановиться.

4. Е. Брилинский внес еще и другое предложение[4], направленное к тому, чтобы создать стройную систему практических единиц: механических, электрических и магнитных. Он указывает, что этого можно достигнуть, исходя из системы практических механических единиц, основанных на метре, тонне и секунде. Система эта узаконена во Франции и в СССР. Е. Брилинский указывает, что, сохраняя вольт в качестве единицы электродвижущей силы, мы получаем ряд электрических единиц: килоджоуль, киловатт, килоампер, килокулон, миллиом, килофарада и миллигенри.

Практические же магнитные единицы в этой системе будут следующие:

единица	магнитного потока	равна	10^8	единицам CGS;
»	магнитной индукции	»	10^4	» » ;
»	магнитодвижущей силы	»	10^2	» » ;
»	магнитной силы	»	1	единице » ;
»	магнитной проницаемости	»	10^4	единицам » .

Несомненно, практические магнитные единицы этой серии значительно удобнее тех, которые указаны Е. Брилинским в его первом предложении. Единицей магнитного потока здесь остается прамаксвелл. Единица магнитной индукции (10^4 CGS) как раз соответствует тому, что представляется наиболее удобным для области динамостроения и различных областей применения постоянных магнитов.

Единица магнитодвижущей силы, вообще говоря, была бы приемлема для практики, если бы только мы не должны были так или иначе считаться с тем, что область динамостроения широко пользуется другой единицей магнитодвижущей силы, именно «ампер-витком», который никогда не будет оставлен

по двум причинам. С одной стороны, ампер-виток как единица магнитодвижущей силы чрезвычайно удобен в практике расчета магнитных цепей. С другой стороны, в пользу ампер-витка говорят и чисто теоретические соображения. Среди них имеет значение и то обстоятельство, что коэффициент 4π, входящий во многие соотношения, не имеет в них простого физического значения и является лишь результатом того, что его, к сожалению, не ввели в свое время в формулировку закона Кулона, где величина 4π была бы вполне уместна и имела бы совершенно понятный физический смысл, как это указал Хевисайд.

Высказанные в последних строках соображения имеют отношение и к единице силы магнитного поля, так как в практике расчета электрических машин почти исключительно пользуются «ампер-витком на сантиметр». Что касается магнитной проницаемости, то едва ли могут встретиться какие-либо серьезные возражения против того, чтобы в практической системе магнитных единиц магнитная проницаемость пустоты не равнялась численно единице.

5. А. Блондель[2] подвергает критике постановления Скандинавского пленарного собрания МЭК в отношении тех наименований магнитных единиц, которые были приняты, и со своей стороны вносит ряд предложений касательно практических магнитных единиц. Особенно интересны высказываемые А. Блонделем соображения по поводу допустимости при построении системы практических магнитных единиц применения одновременно двух единиц длины: квадранта и сантиметра. При этом он разделяет магнитные величины на две группы: основные величины, к которым могут быть отнесены магнитодвижущая сила, магнитный поток, самоиндукция, магнитное сопротивление и магнитная проводимость, и производные величины — сила магнитного поля (магнитодвижущая сила на единицу длины), магнитная индукция (плотность магнитного потока), магнитная сопротивляемость и магнитная проницаемость.

А. Блондель предлагает практические единицы основных магнитных величин производить от CGS единиц, принимая за единицу длины квадрант, т. е. подобно тому, как это было сделано в отношении основных практических электрических единиц — вольта, ампера, ома и $\frac{1}{\text{ом}}$. Практические же единицы производных магнитных величин А. Блондель предлагает производить от основных единиц путем «гибридизации», принимая за единицу длины сантиметр, подобно тому, что мы фактически

имеем в отношении производных электрических единиц: электрической силы (вольт на сантиметр), плотности тока (ампер на кв. сантиметр), удельного сопротивления (ом-сантиметр) и удельной проводимости ($\frac{1}{\text{ом}}$ на сантиметр). Интересующие нас главнейшие практические магнитные единицы представляются при этом, по А. Блонделю, в следующем виде:

Единица	магнитного потока	равна	10^{8}	единицам	CGS;
»	магнитодвижущей силы	»	10^{-1}	»	» ;
»	магнитного сопротивления	»	10^{-2}	»	» ;
»	магнитной индукции	»	10^{8}	»	» ;
»	магнитной силы	»	10^{-1}	»	» ;
»	магнитной проницаемости	»	10^{9}	»	» .

По моему мнению, А. Блондель совершенно прав, обосновывая свою гибридную систему практических магнитных единиц указанием на то обстоятельство, что в практике прочно установилось применение ряда единиц, могущих при строгой критике показаться нарушающими стройность построения системы электрических единиц. Он приводит следующие примеры:

единица	плотности тока	ампер на кв. сантиметр;
»	электрической силы	вольт на сантиметр;
»	удельного сопротивления . . .	микроом-сантиметр;
»	энергии	киловатт-час;
»	удельной мощности (аккумуляторов)	ватт на килограмм.

А. Блондель справедливо указывает: «Все это является необходимой экстраполяцией практической системы единиц и всякая критика этого может иметь только чисто академический характер и будет бесплодной... Этот способ введения в производные единицы единиц времени и длины, наиболее пригодных в каждом частном случае, не может нарушать связность основных единиц, так как эти единицы времени и длины совершенно точно имеются ввиду в каждом случае. Напротив, этот прием сообщает единицам бо́льшую гибкость и делает их более плодотворными в практических приложениях. Кому придет в голову заставить пользоваться ватт-секундой или джоулем в практике распределения электрической энергии?».

Я полагаю, что приведенные соображения А. Блонделя имеют вполне реальное основание и с ними безусловно необходимо считаться при установлении практических магнитных единиц. Что касается предлагаемых А. Блонделем величин этих единиц, то в отношении их имеют силу почти все те замечания, которые

были мною высказаны выше по поводу обоих предложений Е. Брилинского.

6. Представляют большой интерес попытки «рационализировать» систему практических магнитных единиц путем устранения множителя 4π из выражения магнитодвижущей силы и отнесения его в выражение магнитного сопротивления так, чтобы единица магнитного потока сохранялась неизменной. Из целого ряда предложений этого рода наиболее существенными и обоснованными являются три нижеследующих: а) система Джорджи; б) система Карапетова—Деллингера—Беннетта; в) система Кеннелли.

При построении своей системы Джорджи [5] принимает за единицу длины — метр, за единицу массы — килограмм и за единицу времени — секунду. В системе Карапетова—Деллингера—Беннетта [1, 6, 7] за единицу длины принимается сантиметр, за единицу массы — 10^7 граммов и за единицу времени — секунда. Наконец, Кеннелли [8] рационализирует в отношении 4π практическую систему электрических и магнитных единиц, в которой сохраняется, согласно оригинальной схеме Максвелла, квадрант (10^9 см) в качестве единицы длины. В табл. 1 дана сводка практических магнитных единиц, соответствующих этим системам.

Таблица 1

Практические единицы	В единицах CGS		
	Джорджи	Карапетов—Деллингер—Беннет	Кеннелли
Магнитного потока (прамаксвелл)	10^8	10^8	10^8
Магнитодвижущей силы (ампер-виток)	$4\pi \cdot 10^{-1}$	$4\pi \cdot 10^{-1}$	$4\pi \cdot 10^{-1}$
Магнитного сопротивления	$4\pi \cdot 10^{-9}$	$4\pi \cdot 10^{-9}$	$4\pi \cdot 10^{-9}$
Магнитной индукции	10^4	10^8	10^{-10}
„ силы (ампер-виток на единицу длины)	$4\pi \cdot 10^{-3}$	$4\pi \cdot 10^{-1}$	$4\pi \cdot 10^{-10}$
„ проницаемости	$\frac{1}{4\pi} \cdot 10^7$	$\frac{1}{4\pi} \cdot 10^9$	$\frac{1}{4\pi}$

Прежде всего отметим, что во всех трех системах единицы магнитного потока, магнитодвижущей силы и магнитного сопротивления являются совершенно тождественными и именно такими, какие вполне приемлемы в практике расчета всякого рода магнитопроводов. В этом смысле все три системы удовлетворяют требованиям практичности и применимости. Существенное рас-

хождение в этих системах имеет место лишь в отношении единиц магнитной индукции и магнитной силы. Как уже указывалось выше, практическая единица магнитной индукции, равная 10^4 гауссам, представляется весьма удобной для практики, когда мы имеем дело с ферромагнитными материалами, например, при расчетах электрических машин и всякого рода иных электромагнитных механизмов, при расчетах постоянных магнитов и т. д.

Во всех этих случаях мы обычно имеем дело с магнитными индукциями порядка десятка тысяч гауссов. Ввиду этого предложение Джорджи в отношении практической единицы магнитной индукции я считаю удачным. Предложения же Карапетова—Деллингера—Беннетта (10^8 гауссов) и Кеннелли (10^{-10} гауссов) я считаю совершенно не отвечающими практическим требованиям и потому не приемлемыми при построении системы практических магнитных единиц.

Действительно, 10^8 гауссов являются величиной, примерно в десять тысяч раз превышающей то, с чем мы практически имеем дело, и, повидимому, магнитная индукция в 10^8 гауссов лежит за пределами того, что существует где-либо в природе. Магнитная же индукция в 10^{-10} гауссов неудобна в качестве практической единицы ввиду своей крайней малости. По этой же причине совершенно неприемлема и практическая единица магнитной силы, предлагаемая Кеннелли ($4\pi \cdot 10^{-10}$ эрстедов) и равная ампер-витку на квадрант.

Едва ли можно признать удобным и предложение Джорджи, в системе которого практической единицей магнитной силы является $4\pi \cdot 10^{-3}$ эрстедов, т. е. ампер-витков на метр. Практика расчета магнитопроводов такой единицей не пользуется, а применяет ампер-виток на сантиметр. Последнее настолько укоренилось, что не может быть и речи о чем-либо ином. Поэтому я считаю, что только практическая единица магнитной силы, принимаемая в системе Карапетова—Деллингера—Беннетта, именно как раз ампер-виток на сантиметр, вполне соответствует действительной потребности.

Таким образом, краткий разбор показывает, что ни одна из трех рассмотренных систем рационализированных магнитных единиц не удовлетворяет полностью тем требованиям, которые естественно предъявлять к практической системе единиц и которые должны быть выполнены в возможно большей степени.

7. Итак, существует целый ряд предложений по вопросу о том, какие именно величины, помимо прамаксвелла, можно было бы избрать в качестве практических магнитных единиц.

Представляются на выбор, по крайней мере, три возможные величины в качестве прагильберта и три возможные величины в качестве прагаусса (А. Е. Кеннелли в статье, упомянутой в § 6, говорит о двух величинах, которые возможно было бы принять за прагильберт, и о шести величинах, которые возможно было бы принять за прагаусс).

Однако я выше указывал, что ни одно из имеющихся предложений нельзя рассматривать полностью приемлемым с точки зрения практической применимости. Как же в таком случае быть? По моему мнению, единственный выход заключается в том, чтобы идти дальше по пути «гибридизации», намеченному А. Блонделем, который считает вполне допустимым применение в системе практических магнитных единиц одновременно двух различных единиц длины: квадранта (10^9 см) и сантиметра.

В дополнение к этому я предлагаю принять еще специальную единицу поверхности — квадратный метр. Такой прием не представляет чего-либо неожиданного для электротехника. В практике расчета электрических сетей, например, мы давно уже применяем в качестве единицы длины метр и в качестве единицы площади поперечного сечения провода — кв. миллиметр, т. е. пользуемся специальной единицей поверхности, не вытекающей непосредственно из принятой в данном случае единицы длины. Никаких недоразумений от этого не проистекает. Я полагаю, что совершенно также никаких недоразумений не произойдет и в случае применения предлагаемой мною гибридной системы практических магнитных единиц.

Что же касается рационализирования системы в отношении 4π, то я полагаю, что это безусловно необходимо сделать. Против этого, по существу, в конце концов, не возражает и А. Блондель. Перефразируя вышеприведенные слова его, я позволю себе спросить: кому придет в голову заставить инженера-электрика при расчете электромагнитных механизмов отказаться от ампер-витка в качестве единицы магнитодвижущей силы и от ампер-витка на сантиметр в качестве единицы магнитной силы?

В предлагаемой мною системе практических магнитных единиц не соблюдается тот параллелизм между электрическими и магнитными единицами, которому А. Блондель придает столь большое значение. Но я полагаю, что этому параллелизму, чисто формальному и искусственному, не следует приписывать характера чего-то, имеющего отношение к существу дела. Как бы то ни было, но ведь нельзя же игнорировать тот несомненный факт, что явления электрические и магнитные не тождест-

венны и, хотя они тесно связаны одни с другими, но по самой природе своей различны. Нельзя поэтому требовать как чего-то непреложного, чтобы до конца было выдержано единообразие в построении систем тех характеристик, которыми мы пользуемся при оперировании с теми и другими явлениями.

В табл. 2 приведены предлагаемые мною практические магнитные единицы. К ним присоединен прамаксвелл в качестве уже принятой основной единицы. Во второй графе даны наименования в предположении распространения приставки «пра» на другие единицы, кроме прамаксвелла. Сверх того я пользуюсь наименованием «прагопкинс» для практической единицы магнитного сопротивления в развитии предлагаемого мною наименования «гопкинс» для единицы магнитного сопротивления в системе CGS. Это наименование является сокращением имени Дж. Гопкинсона, так много сделавшего для упрочения представления о магнитном сопротивлении.

Таблица 2

Практические единицы	Наименование	Способ образования	В единицах CGS
Магнитного потока	Прамаксвелл	—	10^8
Магнитодвижущей силы	Прагильберт	Ампер-виток	$4\pi \cdot 10^{-1}$
Магнитного сопротивления	(Прагопкинс)	Ампер-виток: прамаксвелл	$4\pi \cdot 10^{-9}$
Магнитной индукции	Прагаусс	Прамаксвелл: кв. метр	10^4
Магнитной силы	Праэрстед	Ампер-виток: сантиметр	$4\pi \cdot 10^{-1}$
Магнитной проницаемости	—	Прагаусс праэрстед . .	$\frac{1}{4\pi} \cdot 10^5$

В моем разборе других предлагаемых систем содержится достаточно, по моему мнению, материала, который может послужить для обоснования выбора каждой из единиц, входящих в состав предлагаемой мною гибридной системы, и поэтому я на этом больше останавливаться не считаю необходимым. Если только признать желательным при подобном выборе учитывать наибольшее возможное приближение к порядкам величин, с которыми мы обычно встречаемся на практике, а также учитывать и то, что уже твердо и безвозвратно укоренилось в практике, — в таком случае принятие некоторой гибридной системы практических магнитных единиц, рационализированных в отношении 4π, представляется единственно целесообразным.

Литература

[1] Bennet E. Introductory Electrodynamics for Engineers. New York, 1925.
[2] Blondel A., Revue Générale de l'Électricité, t. XXVIII, 1930.
[3] Brylinski E., Revue Générale de l'Électricité, t. XXVIII, 1930.
[4] Brylinski E., Comtes Rendus, t. CXCI, 1930; Revue Cénérale de l'Électricité, t. XXIX, 1931.
[5] Georgi G., Proc. Phys. Soc., vol. V, 1902.
[6] Dellinger I. H., Electr. World, vol. LXII, 1913.
[7] Karapetoff V. The Magnetic Circuit. New York, 1911.
[8] Kennelly A. E., Revue Générale de l'Électricité, t. XXVII, 1930.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ ПО МАГНИТНОМУ АНАЛИЗУ И МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ В СССР И БЛИЖАЙШИЕ ЗАДАЧИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Изв. АН СССР, ОТН, № 2, 1937, стр. 219—232

1. В самом широком смысле слова термин «дефектоскопия» можно определить таким образом: дефектоскопия есть область технической физики, занимающаяся вопросами контроля и обнаружения дефектов в материалах и изделиях без разрушения и повреждения обследуемых объектов.

Под это определение подойдут все те разновидности методов дефектоскопии, которые применяются на практике. В сущности говоря, это определение покрывает как вопросы микродефектоскопии, так и вопросы макродефектоскопии. Часто в практике бывает важно вскрыть дефекты строения металла, дефекты, происшедшие вследствие тех или других неправильностей термической обработки, дефекты, которые связаны с текстурой прокатного листового материала (что при вытяжке вызывает осложнения и в ряде других случаев может быть нежелательно) и т. п. Все это обычно вскрывается специальными методами анализа, которые, будучи приспособлены к обнаружению нежелательных сторон в структуре материала, фактически являются методами микродефектоскопии.

В то же время перед практикой стоят огромные задачи в области макродефектоскопии, а именно задачи обнаружения как в исходных материалах, так и в изделиях всякого рода макродефектов: поверхностных и глубинных трещин, волосовин, раковин, шлаковых включений, коррозии, неудовлетворительного покрытия и т. п.

Таким образом, мы имеем чрезвычайно разностороннее поле приложения сил специалистов в области дефектоскопии. Собственно говоря, трудно представить себе какую-нибудь

отрасль народного хозяйства, в которой в том или другом виде не нашли бы применения методы дефектоскопии. Во всем мире в этом направлении идет огромная работа. Нельзя сказать, чтобы мы отставали в отношении исследовательской работы от того, что делается за границей, но нам еще много нужно сделать для внедрения методов дефектоскопии в жизнь.

2. Рассматривая с самой общей точки зрения вопросы дефектоскопии, полезно сказать несколько слов для характеристики различных объектов дефектоскопии. Можно исходить из различных признаков при обзоре объектов дефектоскопии.

Начнем с вопроса о природе материала. Чаще всего на практике мы имеем дело с материалами ферромагнитного характера (железо, сталь, чугун и др.). Главнейшее значение в ближайшее время будет иметь именно дефектоскопия в области магнитных материалов. Но металлы могут применяться и немагнитные, как, например, медь, алюминий, бронза и др., которые также во многих случаях нуждаются в контроле. Есть полная возможность применять методы дефектоскопии и в отношении немагнитных металлов. Наконец, можно мыслить в качестве объектов дефектоскопии и неметаллические материалы, например пластмассу, фарфор, дерево и т. д. В настоящее время область дефектоскопии пока мало интересуется такого рода материалами, но недалеко то время, когда в ряде случаев на производстве придется применять методы дефектоскопии и в отношении неметаллических материалов. Здесь применимы все методы так называемого просвечивания материала.

Можно классифицировать объекты дефектоскопии и по стадиям производства.

Материалы в сыром виде чрезвычайно полезно контролировать до их обработки. Очень часто заводы-производители говорят о необходимости внедрять методы дефектоскопии на заводах, производящих сырой материал. Это в значительной степени облегчит дальнейшую работу заводов, изготовляющих разного рода изделия.

Затем следует заготовка, которую в большинстве случаев необходимо подвергать предварительному контролю, чем предопределяется дальнейшее направление заготовки.

И, наконец, методами дефектоскопии необходимо контролировать изделия немедленно после их выпуска и в процессе их эксплуатации. Мы знаем, что в ряде случаев контроль в процессе эксплуатации играет весьма существенную роль. Например, рельсовая дефектоскопия является одним из самых суще-

ственных технических условий безаварийной эксплуатации ж.-д. транспорта.

Что касается формы объектов, которые приходится обследовать, то здесь мы имеем чрезвычайное разнообразие. При применении методов дефектоскопии, при разработке различной аппаратуры для контроля и обнаружения дефектов приходится очень считаться с формой объектов. В зависимости от формы объектов изменяются как самые методы дефектоскопии, так и вспомогательные приспособления. Объекты могут иметь форму тела вращения (круглые стержни, трубы, шары и т. д.); их простая геометрическая форма, вообще говоря, облегчает применение некоторых методов дефектоскопии. Затем мы имеем прокат и изделия определенной длины, с неизменным поперечным сечением самой разнообразной формы; они представлены большим количеством объектов, которые часто требуют специфического подхода при разрешении вопроса о дефектоскопии. Предметом особого внимания является листовой прокат, который именно требует применения особых методов дефектоскопии. Наконец, встречаются объекты весьма разнообразных форм, характеризующихся либо плавным изменением поверхности, либо более или менее острыми углами (различные изделия массового производства, коленчатые валы и т. д.).

Можно подразделять объекты, подвергающиеся дефектоскопии, и с точки зрения их размера. Мы встречаемся с объектами крупного размера (большие отливки и поковки), затем следуют объекты среднего размера (части машин, станков и т. д.) и, наконец, мелкие детали и изделия массового производства.

Беглый обзор объектов, к которым применяются и могут быть применены методы дефектоскопии, свидетельствуют о большом разнообразии специфических условий и требований, предъявляемых к методам дефектоскопии со стороны практики. Нет универсального метода, который был бы применим во всех без исключения случаях. В зависимости от цели контроля, от обстоятельств, определяемых материалом, стадией производства, формой и размерами объекта контроля, приходится избирать тот или иной метод дефектоскопии, с учетом современного состояния этой отрасли прикладной физики.

3. В настоящее время существует очень много методов дефектоскопии и они более или менее широко применяются у нас.

Самым старым, примитивным методом является метод визуальный, т. е. метод простого осмотра изделий. Он применяется

с древних времен. В настоящее время мы иногда несколько вооружаем наш глаз оптическим инструментом, хотя бы простой лупой. Этот метод является до сих пор вполне правомочным и во всяком производстве он обычно применяется в первую очередь. Часто о нем мало говорят, но по существу это очень важный метод. Всякое дальнейшее вооружение глаза, вообще говоря, изменяет этот метод качественно. Так, например, некоторые методы магнитной дефектоскопии, о которых мы будем говорить несколько позже, являются по существу визуальными методами, только с лучшим вооружением глаза.

Затем, идя в историческом порядке, следует упомянуть примитивный акустический метод. Это — простое выстукивание объекта, метод перкуссии, который можно назвать архаическим методом. Еще десятки тысяч лет тому назад первобытный человек пользовался методом перкуссии для того, чтобы обнаруживать дефекты в гончарных изделиях. Но и в настоящее время этот метод перкуссии, т. е. выслушивание объекта в связи с ударами молотком или каким-либо иным инструментом, весьма распространен, в особенности на транспорте, и едва ли удастся полностью изжить этот по существу примитивный метод.

Акустический метод, по моему мнению, может получить значительное развитие, если ему будет уделено достаточное внимание. Для контроля всякого рода движущихся механизмов, для их регулировки он является и до сих пор в высокой степени ценным. При помощи стетоскопов выслушиваются отдельные части движущихся механизмов; на больших заводах, которым приходится строить и монтировать крупные машины-двигатели, этот метод может с успехом применяться в процессе сборки и регулировки машин. Правда, здесь приходится говорить о специальной тренировке уха того человека, который занимается применением акустического метода дефектоскопии. Но, с другой стороны, ухо — столь деликатный орган, что позволяет на фоне сложных шумов дифференцировать, выделять особые шумы, характеризующие те или иные дефекты в механизме. Вероятно, возможны дальнейшие усовершенствования в этой области. Применение специальной системы стетоскопов с использованием микрофонов, усилителей и фильтров может дать много существенно нового. Пока этим специально не занимались.

4. От примитивного акустического метода я перехожу к методу ультраакустическому, который состоит, так сказать, в акустическом «просвечивании» всей толщи обследуемой детали

при помощи тонкого пучка звуковых волн высокой частоты — порядка миллионов и даже многих миллионов периодов в секунду.

Достижениями проф. С. Я. Соколова, разработавшего ультраакустический метод дефектоскопии, наша страна должна гордиться, потому что во всем мире в этой области сделано еще очень мало и мы идем в этом направлении впереди. Этот метод имеет исключительную ценность, так как он позволяет контролировать ультраакустическими колебаниями огромную толщу металла (можно говорить о толще в метр) и обнаруживать в нем все макродефекты.

Ультраакустический метод интересен еще тем, что он допускает возможность регистрации и, я полагаю, автоматизации наблюдений. Особенный интерес он представит при обнаруживании пороков и дефектов в очень больших объектах; для мелких массовых изделий мы, быть может, не будем применять его особенно широко в ближайшее время. Во всяком случае этот метод таит в себе огромные возможности, вплоть до возможности анализа структуры. Нужно обратить на этот метод очень серьезное внимание, чтобы сохранить первенство СССР в этой области и двигаться более быстрыми шагами вперед. Несомненно, за границей будут внимательно следить за нашими достижениями, и необходимо принять надлежащие меры, чтобы сохранить за нами ведущую роль в ультраакустической дефектоскопии.

Работы проф. С. Я. Соколова проводились в Ленинградском электротехническом институте и в Центральной радиолаборатории.

5. Остановлюсь теперь на рентгеновском методе. Метод просвечивания при помощи рентгеновских лучей был разработан раньше, чем ультраакустический, — он существует уже десятки лет. Этот метод позволяет реализовать глубокую дефектоскопию довольно хорошо, но надо отметить, что потребная для него аппаратура не всегда бывает портативной и дешевой.

Особенно важно, что, пользуясь методами рентгеноскопии, можно получать стереограмму, т. е. пространственную картину всех дефектов, расположенных внутри какого-нибудь массивного изделия; причем, повидимому, при помощи подобной стереограммы можно определить место нахождения порока с точностью до долей миллиметра и таким путем в целом ряде случаев можно вполне точно обследовать всю толщину очень ответственных частей механизмов, крупных заготовок для ответственных изделий и т. д. Но, конечно, в этой области

нужно немало поработать для того, чтобы рентгеностереограмметрия получила широкое применение на производстве.

Помимо применений в области макродефектоскопии, рентгеновский метод интересен еще в другом отношении: он может быть очень ценным для анализа структуры. Это — область рентгенографии. Рядом с этим можно поставить и применение гамма-лучей. Рентгенограммы Лауэ, интерференционные пятна, изучение характера их в зависимости от различных факторов, — все это может много дать для анализа и контроля структуры.

Днепропетровский физико-технический институт, Ленинградский физико-технический институт и другие лаборатории работают в этой области. В области рентгеностереограмметрии работает проф. А. А. Глаголева-Аркадьева. Несомненно, этому делу нужно уделить больше сил и внимания. Хотя в настоящее время эти методы считаются несколько громоздкими и неудобными для массового применения, все же возможно упрощение и удешевление необходимой аппаратуры.

6. Перехожу к методам, составляющим основное содержание работ настоящего совещания, к методам магнитным, электрическим и электромагнитным вообще. Их иногда трудно бывает четко разграничить. Поэтому при общем обзоре этих методов я в основном буду придерживаться порядка, определяемого назначением их в отдельных частных случаях.

Прежде всего сделаю краткое замечание относительно качественной и количественной стороны методики дефектоскопии. Очень часто говорят: такой-то метод магнитной дефектоскопии имеет только качественный характер и с помощью его нельзя получить количественных показателей. По моему мнению, вообще нельзя установить, как общее правило, что одни методы годятся только для качественного контроля, а другие специально приспособлены для количественного обследования. Каждый метод, который применяется сейчас только как метод качественного обследования, при дальнейшем его развитии, при уточнении приемов наблюдения и усовершенствовании аппаратуры, может превратиться в метод, дающий количественные показатели. Это можно сказать буквально по отношению к каждой области дефектоскопии.

7. Так называемый магнитный анализ, охватывающий различные методы контроля изотропной структуры, представляет собой область микродефектоскопии, поскольку магнитный анализ применяется для обнаружения пороков и неправильностей структурного характера.

Магнитные методы контроля структуры основаны на зависимости магнитных и электрических свойств металлов от их структуры. Совершенно несомненно, что всякое изменение структуры, например, разного рода сталей, в зависимости от характера термической обработки, от количества различных компонент (аустенита, зернового или пластичного перлита, цементита и т. д.), от степени обезуглероживания или цементации, от характера закалки, влияет на качество материала, — и все это может быть объектом магнитного анализа, или, говоря более обще, электромагнитного анализа.

Металлографический, рентгеновский и механический методы анализа структуры, конечно, неизменно остаются ценными методами исследования, но магнитный метод анализа структуры обладает серьезным преимуществом в смысле быстроты испытания, а также в смысле сохранности обследуемых объектов, которые при применении этого метода практически не подвергаются никаким механическим воздействиям. После сопоставления данных магнитного анализа с данными, полученными при помощи других методов и касающимися структуры, механических свойств и химического состава металла, мы имеем возможность быстро и достаточно надежно судить о качестве материала или изделий в отношении степени отклонения их структуры от некоторого стандарта. Таким образом, методы магнитного анализа приобретают большое практическое значение.

Надо сказать, что в этой области в нашей стране проводится весьма большая работа. Многие научно-исследовательские учреждения и заводские лаборатории уделяют большое внимание вопросу анализа структуры. Трудно перечислить всех работающих в СССР в этой области. Конечно, очень важны теоретические исследования процессов, протекающих в ферромагнитных материалах. Проф. В. К. Аркадьев является старейшим в нашем Союзе теоретиком в области ферромагнитизма; его талантливейший ученик — проф. Н. С. Акулов — очень много сделал в области теории ферромагнитных процессов и пришел к ценным практическим результатам. Можно назвать также Я. Г. Дорфмана, Р. И. Януса.

Мы имеем целый ряд выдающихся работников в этой области, которыми должны гордиться. Своими исследованиями они создают теоретические предпосылки для развития методов магнитного анализа структуры. Институт физики МГУ, Центральный институт машиностроения, Центральная лаборатория ГПЗ № 1, Институт ж.-д. транспорта НКПС, Уральский

физико-технический институт, Сибирский физико-технический институт, Всесоюзный институт авиационных материалов и т. д. — все они провели много ценных научно-исследовательских работ, приведших к осуществлению ряда приборов для магнитного анализа.

Что касается разработанных и отчасти применяемых в СССР методов, то здесь мы имеем большое разнообразие. Одни методы можно назвать чисто магнитными, и термин «магнитный анализ» создан применительно к этим методам. Другие методы следует назвать электромагнитными, потому что в конце концов мы в них имеем дело не только с различием магнитных свойств отдельных компонент ферромагнитного материала, но также и с его электрическою проводимостью.

Мне представляется, что очень многообещающим методом является метод анализа гармоник. Он еще начинает развиваться, но это — метод, который при внедрении его в практику может дать многое. Метод основных магнитных параметров (насыщение и поле насыщения, коэрцитивная сила и т. д.) также заслуживает большого внимания и в ряде случаев оказался весьма ценным.

Для магнитного контроля, по существу — для магнитного анализа, уже очень давно применялся у нас простой магнитометрический метод: магнитная стрелка подвергается воздействию со стороны намагниченного объекта; по отклонению ее в сравнении с нормальными изделиями можно судить об объекте, и несомненно здесь проявляется качество структуры. Лет 30 тому назад на некоторых уральских заводах был распространен дифференциальный магнитометрический прибор — магнитные весы инж. Крылова. В нем применялась магнитная стрелка, причем действие на нее со стороны испытуемого объекта уравновешивалось действием нормального объекта, и таким путем обнаруживались дефекты структурного характера. Это есть метод магнитного анализа в сравнительно примитивной форме. В настоящее время мы имеем гораздо более совершенные методы магнитного анализа, в основном использующие принцип электромагнитных, или индукционных, весов.

Дифференциальный индуктивный метод был предложен Юзом лет 75 тому назад. Этот метод долгое время мало применялся, а сейчас он играет большую роль. Юза, пожалуй, можно считать родоначальником электромагнитної дефектоскопии, потому что именно он предложил свои «весы» для обнаружения пороков.

То, что мы сейчас делаем в области индукционных, или электромагнитных, весов, это фактически есть дальнейшее усовершенствование основной идеи Юза. Юз пользовался простым телефоном. Мы теперь нередко пользуемся значительно более чувствительными индикаторами, но суть дела остается та же самая.

Кстати, я хотел бы сделать небольшое замечание по поводу терминологии. По моему мнению, электромагнитные весы (индукционные весы) не следует называть магнитными весами. Было бы полезно соблюдать правильную терминологию и относить термин «магнитные весы» к прибору типа Крылова, где мы дифференциально воздействуем на магнитную стрелку двумя намагниченными объектами и где нет речи о первичной и вторичной катушках. Название же «электромагнитные весы» следует относить к разновидностям весов Юза.

Метод вихревых токов, разработанный проф. К. К. Хреновым и инж. С. Т. Назаровым для целей макродефектоскопии, можно было бы применить и для электромагнитного анализа. Необходимо только несколько развить этот метод, превратив его в дифференциальный для того, чтобы придать ему еще большую чувствительность. В методе проф. К. К. Хренова на характер вихревых токов влияют не только магнитные качества исследуемого объекта, но и его чисто электрические свойства. Таким образом, этот метод, подобно другим электромагнитным методам, полностью годится и для обследования немагнитных материалов.

Я позволю себе указать еще, что при дальнейшей разработке методов магнитного анализа следует подумать и о методе магнитной вязкости. Явление магнитной вязкости до настоящего времени сравнительно слабо изучено, хотя оно было открыто около 50 лет тому назад. Оно в высшей степени чувствительно в отношении всякого рода обстоятельств, тесно связанных со структурой ферромагнитного материала и с характером его термической обработки. В соответствии с этим при помощи метода магнитной вязкости можно получить весьма характерные данные.

Итак, в области магнитного анализа у нас в Союзе проделана большая работа. Есть очень много ценных результатов, кое-что уже внедрено в практику, но еще больше нужно сделать и поэтому придется много поработать в дальнейшем.

8. Контроль степени анизотропии материала, контроль так называемой текстуры особенно важен для прокатных материалов, где вследствие упорядоченного расположения кристаллитов

получается неоднородность механических, магнитных и других свойств по разным направлениям. Контроль текстуры имеет значение при определении степени пригодности листового проката для вытяжки и ряда других производств. В основном методы, применяемые при магнитном и электромагнитном анализе, могут быть пригодны и при контроле текстуры.

Интересно отметить подающий большие надежды на широкое применение метод магнитных моментов, осуществляемый в приборе — структурном динамометре, — построенном проф. Н. С. Акуловым и доц. Н. Д. Брюхатовым. Этот прибор позволяет легко обнаруживать в прокатном материале анизотропию и может оказаться очень ценным для контроля текстуры. Однако в таком виде, в каком этот прибор имеется сейчас, он еще не может быть пригодным для дефектоскопии в собственном смысле этого слова. Действительно, чтобы исследовать текстуру материала, нужно его разрушить, нужно вырезать из листа определенные образцы. Но этот прибор можно переконструировать, поменяв местами магнит и обследуемый объект. Для этого придется подвесить на крутильных весах не диск, вырезанный из обследуемого листа, а колоколообразный магнит или небольшой электромагнит соответствующей формы. Тогда получится возможность контролировать текстуру проката, не разрушая его, и в таком виде это будет простой и удобный прибор, который явится дефектоскопом в полном смысле этого слова.

Баллистический метод контроля текстуры стальных листов, разработанный Г. Н. Аксеновым (Днепропетровский физико-технический институт), при всей надежности даваемых им результатов, также требует вырезания образцов из обследуемых листов, т. е. также требует разрушения контролируемого объекта. И в данном случае необходимо попытаться усовершенствовать метод таким образом, чтобы он не требовал вырезания образцов из листа. Этого несомненно можно достигнуть.

Метод вихревых токов (метод проф. К. К. Хренова) при дальнейшем его развитии, именно при преобразовании его в дифференциальный метод, может превратиться в очень удобный для практики метод контроля текстуры проката.

9. Контроль поверхностных слоев (обезуглероживание, цементация) и глубины покрытий находится на границе между магнитным (электромагнитным) анализом и контролем поверхностных и глубинных дефектов. В этой области у нас имеются некоторые ценные достижения. Отметим работы проф. Н. С. Акулова, который применяет различные варианты индукцион-

ных весов, а также новый, очень интересный термоэлектрический метод, предложенный А. В. Нифонтовым.

10. Вопрос о контроле поверхностных дефектов имеет большое принципиальное значение. Конечно, очень важно, чтобы в изделиях не было внутренних дефектов, но несомненно, что в большинстве случаев разрушение изделий в процессе работы начинается именно с поверхности. В этом отношении чрезвычайно наглядные разъяснения дал в своих работах акад. А. Ф. Иоффе. Ему, между прочим, принадлежит замечательный опыт с каменной солью: оказывается, что по сопротивлению на разрыв стержень из каменной соли может приблизиться к металлу, если путем смачивания его поверхности, так сказать, закрыть все поверхностные трещины. То же самое мы встречаем и в металлических изделиях. При всяком напряжении излом изделия чаще всего начинается с поверхностных трещин. Поэтому мы должны уделять особо серьезное внимание контролю поверхностных дефектов. В этой области у нас довольно много уже сделано и многое делается.

Как известно, одним из наиболее распространенных во всем мире методов контроля поверхностных дефектов является метод порошков или магнитных суспензий, который начинает широко применяться и у нас. Этот метод основан на том, что при прохождении магнитного потока через изделие из ферромагнитного материала всякие поверхностные дефекты, трещины, волосовины и т. д. дают местный поток рассеяния. Таким образом, если поверхность намагниченного изделия посыпать железным порошком, то порошок скапливается на трещинах, волосовинах и т. п., которые таким путем легко обнаруживаются.

Повидимому, еще более удобным является метод так называемых магнитных суспензий. В некоторой жидкости (трансформаторном масле, керосине, бензине) взмучивается тончайший магнитный порошок, обычно крокус, приобретающий при соответствующей термической обработке более или менее сильные магнитные свойства. Подобной жидкостью со взвешенными частичками крокуса поливают надлежащим образом намагниченное изделие из ферромагнитного материала; крокус, попадая в поле потоков рассеяния, обусловленных трещинами, волосовинами и т. п., оседает и дает очень отчетливую картину поверхностных дефектов.

Метод порошков и магнитной суспензии в основном должен рассматриваться как метод чисто поверхностной дефектоскопии. Что касается глубины залегания надежно обнаруживаемых дефектов, то принято говорить о десятых долях миллиметра.

На такой глубине пороки, несомненно, легко обнаруживаются методом порошков и магнитной суспензии. Однако, повидимому, этим методом возможно обнаруживать и пороки на заметно большей глубине, на глубине нескольких миллиметров, если только применять достаточно сильное намагничивание. Окончательное решение этого вопроса требует специального изучения.

Область применения метода порошков и магнитной суспензии охватывает объекты самых разнообразных форм и размеров, от мелких изделий массового производства до крупных поковок, валов и т. д.

В практике применения рассматриваемого метода дефектоскопии имеет большое значение вопрос о способе намагничивания контролируемых объектов. Тут можно применять поле электромагнита или поле специальных катушек для намагничивания. В одних случаях пользуются остаточным намагничиванием, в других случаях осаждение порошка производится в присутствии намагничивающего поля. В ряде случаев очень ценным оказывается применение так называемого циркулярного намагничивания, т. е. намагничивания изделия при посредстве электрического тока (постоянного или переменного), который пропускается через изделие. В последнее время проф. Н. С. Акулов предложил способ, в котором комбинируется продольное и циркулярное намагничивание. Это, так сказать, спиральное намагничивание позволяет обнаруживать поверхностные трещины, как угодно направленные, ибо для обнаружения их необходимо, чтобы магнитный поток шел поперек трещин.

Вопрос о качестве порошков имеет, конечно, серьезное значение. У нас много сделано в этом отношении. Пожалуй, можно сказать, что наши порошки не только не хуже, но даже лучше того, что имеется за границей, и в частности в Америке.

Известное значение имеет и вопрос о последующем размагничивании проконтролированных изделий. Дело в том, что изделие, которое подверглось такого рода контролю, должно быть в дальнейшем размагничено, потому что к намагниченному изделию могут прилипать опилки и т. п. Обычно для размагничивания изделий их подвергают воздействию переменного магнитного поля, амплитуда которого непрерывно уменьшается до нуля. Так как для надежного размагничивания необходимо, чтобы подобное переменное магнитное поле действовало на изделие по трем взаимно перпендикулярным направлениям, то можно рекомендовать следующий способ, особенно пригодный для сравнительно небольших изделий массового производства.

Изделия эти необходимо непрерывной лентой пропускать с соответствующей скоростью сначала вдоль оси простой катушки, питаемой переменным током, действующая сила которого неизменна. Выходя из поля этой катушки, изделие будет подвергаться перемагничиванию с непрерывно уменьшающейся амплитудой, в пределе доходящей до нуля. Затем то же изделие должно поступать в область вращающегося магнитного поля, ориентированного в плоскости, перпендикулярной оси указанной выше размагничивающей катушки. Прохождение изделия сквозь это вращающееся магнитное поле будет эквивалентно воздействию на него со стороны двух непрерывно ослабевающих магнитных полей, перпендикулярных между собою, а также перпендикулярных направлению первого размагничивания простой катушкой. Конструктивное оформление такой комбинированной размагничивающей системы легко может быть выполнено в каждом частном случае применительно к форме и размерам изделий.

Вопросами, относящимися к методу порошков и магнитных суспензий, кроме упомянутых выше институтов и лабораторий, занимаются лаборатории Харьковского тракторного завода, Харьковского турбинного завода, ленинградского завода «Электросила», Ленинградского металлического завода им. Сталина и др. Много работал и работает в этой области Ф. М. Карпов. Так что мы уже имеем большой актив специалистов в этой области.

11. Методы контроля внутренних дефектов — глубоких трещин, шлаковых включений, раковин и т. п. — относятся к области глубокой дефектоскопии. В этом отношении у нас сделано немало.

В данной области очень большая работа проведена Ф. М. Карповым, разработавшим пондеромоторный индикатор. Для ряда областей применения, например для рельсовой дефектоскопии Ф. М. Карпов создал законченные конструкции соответствующей аппаратуры. Представляют значительный интерес исследования, проводимые в Уральском физико-техническом институте с целью теоретического анализа границ применения метода Ф. М. Карпова в отношении глубины залегания дефектов, которые еще могут быть обнаружены. Надо думать, что этот метод, при дальнейшем изучении его в лабораторной обстановке и на производстве и при разработке специальной аппаратуры для ряда особых случаев, может найти более широкое применение, чем это имеет место до настоящего времени.

Представляют также интерес и работы по глубокой дефектоскопии, проводимые А. П. Бутурлинским в Научно-исследовательском институте пути и строительства НКПС на основе некоторого видоизменения пондеромоторного метода Ф. М. Карпова.

Для глубокой дефектоскопии находят себе применение и электромагнитные методы в разнообразном их оформлении. К этой категории относится и упомянутый уже выше метод вихревых токов, разработанный проф. К. К. Хреновым и инж. С. Т. Назаровым (Московский институт инженеров транспорта НКПС) специально для контроля сварных швов, но, несомненно, пригодный для контроля внутренних дефектов и в ряде других случаев, в особенности если этот метод будет несколько доразвит и, в частности, если он превратится в дифференциальный метод. В Сибирском физико-техническом институте А. Б. Сапожниковым разработан прибор для рельсовой дефектоскопии также на принципе использования токов Фуко.

По поводу электромагнитных методов глубокой дефектоскопии необходимо указать, что они по существу пригодны и для контроля изделий из немагнитных металлов. Я полагаю, что при дальнейшей исследовательской работе и развитии и усовершенствовании этих методов следует иметь в виду целесообразность некоторого понижения частоты применяемого переменного тока. Это позволит глубже проникать внутрь металла.

В области электромагнитных методов глубокой дефектоскопии работает целый ряд перечисленных институтов и лабораторий. К этому списку можно еще добавить лабораторию Коломенского завода и Институт инженеров сигнализации и связи НКПС.

12. Итак, необходимо констатировать, что в научно-исследовательских учреждениях и заводских лабораториях СССР в общем проделана большая работа по изучению вопросов дефектоскопии, благодаря чему имеются ценные достижения, нашедшие многочисленные практические приложения. Ввиду неотложности и большого практического значения вопросов дефектоскопии, необходимо на ближайшее время возможно полнее использовать уже имеющиеся, наиболее выдающиеся достижения, целесообразно внедряя их в различные производства и области народнохозяйственной жизни СССР.

Учитывая исключительно важное народнохозяйственное значение методов дефектоскопии, следует признать далеко недостаточными достигнутые до настоящего времени результаты как в области изучения теоретических основ дефектоскопии, так и

в области широкого внедрения ее методов в практику. Как ни много сделано, но это капля в море той широкой потребности, которая у нас ощущается, благодаря чрезвычайному развитию промышленности, транспорта и других областей народного хозяйства. Надо сделать еще очень много. Как этого достигнуть?

Неотложно необходимо значительное усиление исследовательской работы в области дефектоскопии. Для осуществления этого желательно, нисколько не боясь параллелизма, всемерно поддерживать и поощрять продолжение исследовательской и изобретательской работы, проводившейся до настоящего времени во многих научных и заводских центрах СССР, так как только это позволит наилучшим образом выявить всю творческую инициативу большого количества лиц, занимающихся вопросами дефектоскопии.

Необходимо признать, что в высокой степени опасно сейчас нарушать работу огромного количества ячеек, которые развились по всему лицу нашей страны. Следует всемерно поддерживать их и поощрять, нисколько не ломая в основном тех коллективов, которые создались на местах. Это — основное условие для дальнейшего успешного развития исследовательской работы в области дефектоскопии.

Безусловно уместно поставить вопрос о необходимости создания центрального института дефектоскопии для того, чтобы целый ряд вопросов теоретического характера в самом широком масштабе, самым глубоким образом мог быть подвергнут изучению наряду с чисто экспериментальными исследованиями, относящимися к данной области. Этот вопрос настолько важен для народнохозяйственной жизни и так много нам нужно еще сделать, что не следует бояться трудностей организации нового научно-исследовательского учреждения — специального института. Конечно, надо относиться с большой осторожностью к вопросу об учреждении новых институтов, но ведь институт дефектоскопии — это институт для изучения и углубления проблем, относящихся к одному из актуальнейших вопросов народного хозяйства.

Наконец, ввиду чрезвычайно большого значения вопросов дефектоскопии, как теоретических, так и практических, было бы целесообразно создать специальный орган — журнал дефектоскопии. Сейчас работы по дефектоскопии печатаются среди другого материала в ряде журналов. Больше всего работ по дефектоскопии напечатано в журнале «Заводская лаборатория», издаваемом НКТП. Это — очень ценный журнал, но

вопросы дефектоскопии не играют там центральной роли, и вся работа по дефектоскопии, которая проведена у нас и за границей, не нашла себе полного отражения в этом журнале. Желательно иметь такой орган, для которого эта тематика была бы основной.

Подобными мероприятиями мы действительно поднимем работу в области дефектоскопии на должную высоту, достигнем больших результатов по внедрению ее методов в промышленность, транспорт и т. д. и не только догоним, но и перегоним в этой области передовые капиталистические страны, тем более, что по целому ряду отделов дефектоскопии мы уже идем впереди в смысле теоретических разработок и отстаем только в отношении массового применения.

ВЫСТУПЛЕНИЕ НА I ВСЕСОЮЗНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕ БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ ТОКАМИ СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Вопросы электропередачи бсльших мощностей на большие расстояния. Энергоиздат, Л.-М., 1932, стр. 100—103

Разрешите мне сказать несколько слов в связи с докладами т. Чернышева, Ситникова и Ларионова относительно передачи энергии постоянным током высокого напряжения. Вопрос этот, как вам хорошо известно, — вопрос старый, но имеет большую историю. Огромная литература существует по этому вопросу. Есть много сторонников этой системы передачи энергии и не меньше противников — защитников переменного тока. Но, что бы ни говорили, как бы ни дебатировали вопрос, все-таки факт остается фактом, все-таки «при всех недостатках сегодняшнего дня передачи постоянным током, будущность остается за нею». Я цитирую это из доклада А. А. Чернышева и М. М. Ситникова. Несомненно, будущее за передачей постоянным током.

Какие же из этого необходимо сделать выводы?

Прежде всего мне представляется совершенно невозможным, чтобы при проектировании сверхмощных линий передачи и тех магистралей, грандиозных по своему масштабу, которые должны покрыть нашу страну, учитывались лишь ближайшие перспективы передачи энергии переменным током.

Учитывая будущую роль постоянного тока, можно дать некоторый оттенок в направлении работ по сооружению гигантских линий передач, а кроме того, считаясь с тем, что целый ряд вопросов, касающихся передач энергии высокого напряжения постоянным током, еще не нашел окончательного решения, необходимо чрезвычайно сильно развернуть исследовательскую работу в нашей стране для того, чтобы не плестись в хвосте за Америкой и Западной Европой, а по праву занять первенствующее место в этом деле большой важности.

По какому направлению нужно вести исследовательские работы? Мне представляется, что нужно не жалеть средств и сил и идти по всем направлениям, для того чтобы в нашей научно-исследовательской работе выяснить все возможные пути решения этой крупной задачи — передачи колоссальной мощности постоянным током высокого напряжения. Естественно совершенно, что, прежде всего, необходимо большое внимание уделить дальнейшему усовершенствованию старой системы Тюри, которая имеет своими представителями ряд установок на Западе, установок, работающих десятки лет и работающих довольно успешно. Об этой успешности можно судить по тому, что акционеры тех компаний, которые эксплуатируют эти установки, получают дивиденды, и дело развивается. Значит, это оказывается экономически целесообразным. Надо в этой области работать.

Я с большим интересом прочитал сообщение тов. Ларионова о том, что ВЭИ наметил проработку вопроса о высоковольтных машинах постоянного тока и всех связанных с этим деталей. Это действительно необходимо самым обстоятельным образом изучить. Все это имеет прямое отношение к варианту передачи с изменяющимся напряжением и с неизменной силой тока в цепи, тут намечается целый ряд решений, о которых говорил названный мною докладчик.

Между прочим, интересна возможность применения в системе Тюри трансвертеров; это — комбинация, требующая, несомненно, глубокого анализа в стенах наших лабораторий, и, вероятно, устройства некоторых опытных установок для того, чтобы в реальной обстановке можно было определить все за и против этой системы. Должен сказать, что лично моя симпатия лежит не на стороне системы Тюри. Здесь слишком большую роль играют сложные электромагнитные механизмы. Мне представляется, что будущее в этой области лежит в использовании ионных приборов и в осуществлении высоковольтной системы передачи постоянным током при неизменном напряжении.

Большие возможности представляют, несомненно, еще могущие быть усовершенствованными электронные и ионные аппараты, позволяющие очень экономично производить переход от переменного тока к постоянному и от постоянного тока к переменному. В этой части мы, конечно, должны тоже очень много работать. Мне рисуется это направление работ особенно интересным потому, что в дальнейшем, когда мы осознаем необходимость перехода от передачи трехфазным током к постоянному

току, оно позволит наиболее дешево и просто перелицевать наши имеющиеся установки. В этом случае, если мы будем работать, пользуясь электронными и ионными аппаратами, в генераторной части существующего устройства все останется по-старому. Все основные генераторные единицы будут трехфазными нормальными единицами, и в этом отношении лицо генераторной станции никакого изменения не претерпевает.

Дальше идет повышение напряжения высоковольтным трансформатором. Эта часть установки также остается без существенного изменения. И вот лишь сопряжение высоковольтного трансформатора с линией передачи должно будет совершаться не непосредственно, а через посредство выпрямляющих ионных и электронных аппаратов, и в линию передачи попадет ток постоянного высокого напряжения.

Мне представляется, что теоретически эта сторона вопроса в общем уже проработана в лабораториях и необходимо еще доработать лишь ряд деталей. Может быть, детали эти окажутся не совсем ничтожными, встретятся какие-нибудь затруднения, придется пережить детские болезни, но все основное сделано, и мы можем гордиться тем, что сделано в этом отношении в нашей стране. В работах А. А. Чернышева и М. М. Ситникова мы имеем много ценных достижений. Остается сделать еще некоторое усилие и мы получим возможность перейти от современных генераторных трехфазных установок к линии передачи постоянным током высокого напряжения путем небольшой надстройки, соединяющей высоковольтные трансформаторы с линией передачи. Мне представляется, что это самое здоровое направление в этой области.

Остается еще вторая сторона задачи: как в пунктах потребления энергию постоянного тока напряжением, может быть, до 1000 кв превратить в другую форму, чтобы удобнее было дальше ее использовать? Совершенно никакого сомнения нет в том, что необходимо эту энергию постоянного тока превратить как-то в энергию переменного тока напряжением порядка 100 кв и ниже, чтобы влить ее в нашу нормальную сеть высокого напряжения.

И вот до последних лет можно было сомневаться в возможности осуществить эту очень важную задачу более или менее экономично и просто, но сейчас эта задача разрешена и у нас и в Америке при помощи ионных аппаратов. Эта задача разрешена с исключительно высоким коэффициентом полезного действия, о котором вы слышали из предыдущих докладов. Речь идет о 99 с лишним процентах к. п. д. Таким образом, необхо-

дима только дальнейшая проработка различных частностей в этом вопросе.

Я только что видел в Америке чисто лабораторную схему преобразования энергии постоянного тока в переменный при помощи тиратронов. То же самое осуществлено и у нас при помощи специальных ионных приборов с очень высоким к. п. д. Необходимо это еще несколько доработать. Затем при помощи трансформатора возможно получить то или иное напряжение, которое требуется, чтобы влить энергию в распределительную сеть высоковольтного переменного тока.

Я позволю себе в заключение немного пофантазировать.

Есть еще один способ использования высоковольтного постоянного тока. Мне представляется, что можно к линии передачи постоянного тока приключать параллельно электродвигатели на напряжения порядка миллиона вольт. Переход от тех полуигрушек этого рода, которые мне приходилось видеть, к мощным двигателям — не больше, чем переход от первого зародыша паровой турбины к тем мощным паровым турбинным агрегатам, которые теперь строятся. Я говорю об электродвигателе не обычного типа — электромагнитном, а о мощном «электростатическом» двигателе, если можно так его назвать.

Я вспоминаю старые работы проф. Мышкина, который некогда сконструировал и построил небольшие «электростатические» двигатели, приводившиеся в действие от электростатической машины. Это было проделано в лабораторной обстановке. По этому типу можно построить электродвигатели сколько угодно большой мощности. Речь идет о расположении на валу ряда дисков из изолирующего материала, причем между дисками надлежащим образом располагаются серии металлических остриев, поочередно присоединенных к зажимам высоковольтного генератора постоянного напряжения. При достаточно большом диаметре дисков можно соблюсти необходимые условия для того, чтобы не было пробивания изоляции, а возникали только истечения из остриев. И вот раз приведенная в движение машина продолжает вращаться и может работать не хуже чем паровая турбина. В этой области, мне казалось бы, стоит поработать. Могут быть случаи, когда интересно получить механическую энергию непосредственно от цепи высоковольтного постоянного тока.

Поскольку в нашей стране зародилась идея «электростатического» двигателя, желательно, чтобы эта идея была доведена до конца.

Итак, мне кажется, что перед нами стоит целый ряд задач в связи с тем, что будущность остается за системой передачи энергии постоянным током. Интересно вспоминать, что еще Кельвин (Вильям Томсон) года 42 тому назад, когда он стоял во главе международной комиссии, обсуждавшей вопрос о первой установке на Ниагаре, утверждал, что передача постоянным током единственно рациональная система, но тогдашняя техника не могла реализовать эту идею. Сейчас подошли к такому моменту, когда не сегодня-завтра будет осуществлена грандиозная электропередача, отвечающая идеям Кельвина.

Что же нужно сделать, чтобы мы могли вести продуктивную научно-исследовательскую работу в области изыскания путей и методов передачи энергии постоянным током? Нужно бросить на это все силы и громадные средства.

СПИСОК ТРУДОВ В. Ф. МИТКЕВИЧА

1896

Светопечатание через непрозрачную среду. — Электричество, № 4, стр. 57—60.

Электротехника на Всероссийской промышленной и художественной выставке в Нижнем Новгороде. Статья первая. — Электричество, №№ 23 и 24, стр. 321—324.

1897

Электротехника на Всероссийской промышленной и художественной выставке в Нижнем Новгороде. Статья вторая и третья. — Электричество, № 1, стр. 4—9; № 3, стр. 33—37.

1898

К вопросу о распределении переменных токов при помощи трансформаторов. — Электричество, № 1, стр. 6—8.

Применение телефона при электрических измерениях. — Электричество, № 3, стр. 35—37.

К вопросу о зубчатых арматурах. — Электричество, № 6, стр. 87—94.

Источники электрической энергии. — Сборник статей в помощь самообразованию по математике, физике, химии и астрономии, в. 1. Тип. Мамонтова, М., стр. 423—441.

1899

Новейшие опыты Николы Теслы с токами большой частоты. — Электричество, № 11—12, стр. 163—166.

1900

Электрический словарь, русско-французско-немецко-английский. СПб.,— Электричество. 95 стр. (Совместно с Г. Н. Шведером).

Источники электрической энергии. — Сборник статей в помощь самообразованию по математике, физике. химии и астрономии, в. 2. Изд. 2, вновь перераб. Тип. Мамонтова, М., стр. 413—430.

О заряжении аккумуляторов от цепи переменного тока при помощи алюминиевого выпрямителя. — Протоколы собраний Русского электрического общества, состоящего при электротехническом институте, № 2. Изд. Русск. электр. общ., СПб., стр. 20.

1901

Алюминиевый выпрямитель переменного тока и его применение. — Электричество, № 2, стр. 17—23; № 3, стр. 33—36.

Ein Aluminiumstromrichter für Wechselstrom und seine Anwendung. — Phys. Zeitschr., № 52, s. 747.

[Рец.] Учение об электрической искре В. К. Лебединского. СПб. — Электричество, № 23, стр. 342—343.

1902

К вопросу о нарушении симметрии переменного тока. — ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 2, стр. 17—28.

К вопросу об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги. — ЖРФХО, ч. физ., т. 34, в. 5, стр. 223—228.

Применение алюминиевого конденсатора для получения «поющей» вольтовой дуги. — Там же, стр. 229—232.

Алюминиевый выпрямитель переменного тока. — Физико-математический ежегодник, посвященный вопросам математики, физики, химии и астрономии. Тип. Мамонтова, М., стр. 152—173.

1903

К вопросу о механизме вольтовой дуги. — ЖРФХО, ч. физ., т. 35, в 5, стр. 507—524.

Об условиях возникновения вольтовой дуги. — ЖРФХО, ч. физ., т. 35, в. 9, стр. 675—698.

1904

Об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги. — ЖРФХО, ч. физ., т. 36, в. 1, стр. 13—20.

О явлении Эдисона в воздухе при атмосферном давлении. — ЖРФХО, ч. физ., т. 36, в. 3, стр. 65—67.

О наименьшей электродвижущей силе, необходимой для питания вольтовой дуги. — ЖРФХО, ч. физ., т. 36, в. 8, стр. 259—263.

[Пат.] Приспособление для обмеривания жидкой углекислоты. № 8871, гр. V, заявл. 12 IX 1902.

1905

О вольтовой дуге. — Изв. СПб. политехн. инст., т. 4, в. 1—2, стр. 5—75.

1906

Электроды-зонды для электрометрических работ с электролитами. — ЖРФХО, ч. физ., т. 38, в. 2, стр. 71—73.

К теории флюксметра Грассо. — Там же, стр. 86—94.

1907

Курс переменных токов. Изд. Политехн. инст., СПб.

1908

[Пат.] Электрическая печь для получения окислов азота из воздуха. № 12960, гр. X/XI, охр. свид. № 29494, заявл. 26 V 1906. (Совместно с А. И. Горбовым).

1909

Азотная кислота из воздуха. — Труды Первого менделеевского съезда по общей и прикладной химии, состоявшегося в С.-Петербурге с 20 по 30 декабря 1907 г. Изд. Распоряд. ком. съезда СПб., стр. 268—275. (Совместно с А. И. Горбовым).

1910

Явление тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи. — Электричество, № 7, стр. 185—200.

Теория явлений электрических и магнитных. Изд. Политехн. инст., СПБ.

1912

Магнетизм и электричество. Изд. Суворина СПб., 258 стр.

1913

О горении воздуха в вольтовой дуге. — ЖРФХО, ч. хим., т. 45, в. 5, стр. 1105—1136. (Совместно с А. И. Горбовым).

О горении воздуха в вольтовой дуге. (Заметка по поводу статьи проф. А. В. Сапожникова и др.). — ЖРФХО, ч. хим., т. 45, в. 8, стр. 1693—1697. (Совместно с А. И. Горбовым).

1921

О природе электрического тока. — Электрификация России. (Труды VIII Всероссийского электротехнического съезда в Москве, состоявшегося 1—10 октября 1921 г., в. 1). Изд. Госплана, М., стр. 99—109.

1922

Превращение вольфрама в гелий. — Электричество, № 1, стр. 37—38.

О природе электрического тока. — Телеграфия и телефония без проводов, № 15, стр. 468—480.

1923

On the nature of electric current. — Silbey J. of Engng., V. 37, № 2, p. 24.

1924

Работы В. Томсона (лорда Кельвина) в области электричества и магнетизма. — Электричество, № 6, стр. 309—314.

[Пат.] Способ образования азотной кислоты. № 1428, кл. 12-i, заяв. свид. № 74566, заявл. 14 III 1921. (Совместно с А. И. Горбовым).

[Пат.] Электрический выключатель с выдержкой времени. № 1369, кл. 21-c, заявл. свид. № 77999, заявл. 6 III 1924. (Совместно с др.).

[Пат.] То же. № 1370.

[Пат.] То же. № 1370.

1925

Опыты намагничивания горных пород. — Изв. Геол. ком., т. 44, № 5, стр. 595—621. (Совместно с Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом).

Пат.] Телефонная трансляция с катодными лампами. № 592, кл. 21-a, заявл. свид. № 74243, 30 VIII 1920.

[Пат.] Способ генерирования переменного тока. № 483, кл. 21-d, заявл. свид. № 76276, заявл. 27 I 1923. (Совместно с В. В. Аничковым и др.).

[Пат.] То же, № 484.

1927

О механизме электромагнитной индукции тока. — Электричество, № 2. стр. 49—57.

1928

Физические основы электротехники, ч. 1. Госиздат, М.—Л., 464 стр.

1929

On the transformations of magnetic flux. — ДАН СССР, А. № 6, стр. 131—135.

On the anomalous magnetic flux. — Там же, стр. 136—137.

Anomalous magnetic flux of a toroidal coil. I. The case of a closed iron screen. — ДАН СССР, А, № 8, стр. 171—176.

Anomolous magnetic flux of a toroidal coil. II. The case of an unclosed screen. — ДАН СССР, А, № 11, стр. 259—264.

Total electromotive force of mutual induction. — ДАН СССР, А, № 12, стр. 289—290.

A propos des équations aux dimensions des granfeurs électriques et magnétiques. — Rev. gén. électr., t. 25, № 20, p. 760

[Ред.] Справочная книга для электротехников, т. 4. Изд. КУБУЧ, Л., 1377 стр. (Совместно с М. А. Шателеном и В. А. Толвинским).

1930

К вопросу о применении намагничивания к опробованию бурных железняков. — ДАН СССР, А. № 20, стр. 531—536. (Совместно с Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом и А. А. Турцевым).

Магнетизм. — Электричество, юбилейный номер, стр. 11—16.

Природа электрического тока. — Электричество, № 3, стр. 123—131, 133, 137; № 8, стр. 337—345, 346—347; № 10, стр. 425—426, 431—432, 433—435.

Задачи научно-исследовательских работ в области электротехники. — Бюлл. НИС ПТЭУ ВСНХ, № 2, стр. 41—47.

[Ред.] Справочная книга для электротехников, т. 1—3. Изд. КУБУЧ, Л. (Совместно с М. А. Шателеном и В. А. Толвинским).

[Ред.] Электромашиностроение, т. 2. (Сборник статей). Изд. НТОЭ, А., 142 стр. (Совместно с В. В. Дмитриевым и др.).

1931

Теория переменных токов. (Конспект курсов). Изд. КУБУЧ, Л., 288 стр.

Задачи науки в области электрической передачи энергии. ГНТИ, М., 8 стр.

О практических магнитных единицах. — ДАН СССР, А., № 9, стр. 223—230.

Работы Фарадея в области электромагнитной индукции в связи с его общими физическими воззрениями. — Природа, № 12, стр. 1154—1170.

The work of Faraday and modern developments in the application of electrical energy. — Science at the cross roads. Papers presented to the International congress of the history of science and technology held in London from June 29th to July 3rd 1931 by delegates of the USSR. London, Kniga Ltd., 1931, p. 109—112.

Faraday and electrical science in Russia and USSR. — Nature, 29 VIII, № 3226, p. 359.

Scientific research on applied electricity. — Brit.-russ. Gaz., v. 8, № 3, p. 80.

1932

Физические основы электротехники. Изд. 2, пересм. и доп., КУБУЧ, Л., 495 стр.

Работы Фарадея и современное развитие приложений электрической энергии. ГТТИ, М.—Л., 20 стр. (Доклады советских делегатов на II Международном конгрессе по истории науки и техники. Лондон, июнь—июль 7931 г.).

О стандартах электротехнических обозначений. — Электричество, № 9, стр. 511—512. (Совместно с П. Л. Калантаровым).

В редакцию журнала «Электричество» по поводу реферата Я. Н. Шпильрейна статьи «Fourmarier» в журнале «Электричество», № 5. — Электричество, № 11, стр. 608.

На заводе «Светлана».—Академия Наук на заводах и фабриках Ленинграда. Изд. АН СССР, Л., стр. 179—180.

Выступление на I Всесоюзной конференции по электропередаче больших мощностей на большие расстояния токами сверхвысокого напряжения. — Вопросы электропередачи больших мощностей на большие расстояния. Энергоиздат, Л.—М., стр. 100—103.

К столетию открытия электромагнитной индукции тока. — Сборник Ленинградского электромех. инст., в 1. Изд. КУБУЧ, Л., стр. 99—102.

К вопросу о природе электрического тока. Социалистическая реконструкция и наука, в. 3, стр. 41—67.

[Ред.] Сборник по энергетике, в. 3, ГНТИ, М.—Л., 162 стр. (Совместно с В. В. Дмитриевым и др.).

[Пат.] Устройство для модулирования инфракрасных лучей. № 28135, кл. 74-d, заявл. свид. № 64494, заявл. 16 II 1930. (Совместно с И. С. Шегляевым и др.).

1933

Физические основы электротехники. Изд. КУБУЧ, Л., 459 стр.

Теория переменных токов. (Конспект курса). Изд. ВЗИТО НКТП СССР, Л., 217 стр.

Основные воззрения совершенной физики. (Речь, читанная на торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г.). Изд. АН СССР, Л., XIX стр.

То же. В кн.: Отчет о деятельности Академии Наук Союза Советских Социалистических Республик в 1932 году. Изд. АН СССР, Л., стр. I—XIX.

О «физическом» действии на расстоянии. — Изв. АН СССР, ОМЕН, № 10, стр. 1391—1409.

К вопросу об условности математической трактовки физических явлений. — Электричество, № 12, стр. 1—3.

Выступление на пленуме Совета Энергетического института АН СССР 23 мая 1933 г. (К вопросу о переходе в технике переменного тока с 50 на 100 гц). — Электричество, № 13, стр. 38—39.

Александр Антонович Добиаш. — Усп. физ. наук, т. 13, в. 1, стр. 149—151. (Совместно с В. К. Лебединским).

Письмо в редакцию «Под знаменем марксизма» по поводу статьи Э. Кольмана «Марксизм и естествознание». — Большевик, № 7—8; Под знаменем марксизма, № 4, стр. 228—229.

О позиции И. Е. Тамма в отношении принципиальных воззрений Фарадея и Максвелла. — Под знаменем марксизма, № 6, стр. 278—281.

10 вопросов В. Ф. Миткевича (об определении физико-философского мировоззрения). — Сборник Ленингр. электромех. инст., в. 2. Изд. КУБУЧ, Л., стр. 7—8.

К вопросу о практических магнитных единицах. — Там же, стр. 26—32.

Записка об ученых трудах Г. О. Графтио. — Записки об ученых трудах действительных членов Академии Наук СССР по Отделению математических и естественных наук, избранных в 1931 и 1932 годах. Изд. АН СССР, Л., стр. 48—49.

Записки об ученых трудах К. И. Шенфера. — Там же, стр. 128—132.

Фарадей «против» фарадеевской точки зрения. — Социалистическая реконструкция и наука, в. 4, стр. 47—49.

1934

Основные физические воззрения. Изд. АН СССР, Л., 58 стр.

О некоторых основных положениях, относящихся к области физики. — ДАН СССР, т. 2, № 6, стр. 351—356.

О «физическом» действии на расстоянии. — Электричество, № 1, стр. 15—19.

«К вопросу об условности математической трактовки физических явлений». (По поводу статьи проф. Д. В. Гогоберидзе). — Электричество, № 7, стр. 40—42.

Об ответах М. Л. Ширвиндта и Ю. П. Шейна по поводу десяти вопросов. — Сборник Ленингр. электромех. инст., в. 3. Изд. КУБУЧ, Л., стр. 3—7.

За фарадее-максвелловскую установку в вопросе о природе физических взаимодействий. — Социалистическая реконструкция и наука, в. 8, стр. 97—103.

Ленинградские ученые никогда не забудут Сергея Мироновича. — Правда, 6 XII, № 335. (Совместно с М. Шателеном).

1935

По поводу физических воззрений проф. Д. В. Гогоберидзе. — Электричество, № 22, стр. 42.

Предисловие. — Баженов В. И. и Мясоедов Н. А. Радиомаяки, ч. 1. Гос. изд. по техн. связи, Л., стр. 3—4. (Совместно с А. Чернышевым).

1936

Основные физические воззрения. (Сборник докладов и статей). Изд. 2, доп. Изд. АН СССР, М.—Л., 162 стр.

Фарадей. — БСЭ, т. 56, стлб. 613—618.

К окончанию дискуссии с проф. Д. В. Гогоберидзе об основных физических воззрениях. — Электричество, № 6, стр. 28—30.

К вопросу о природе электрического тока. — Там же, стр. 30—32.

К 70-летию профессора М. А. Шателена. — Электричество, № 24, стр. 40—42.

Выступление на заседании общего собрания АН СССР в прениях по докладу академика Г. М. Кржижановского «Программа работ Академии Наук СССР на 1936 г.» — Вестн. АН СССР, № 4—5, стр. 36—37.

[Ред.] Д. В. Ефремов и М. И. Радовский. Электродвигатель в его историческом развитии. Изд. АН СССР, Л.—М., 660 стр.

Предисловие. Там же, стр. 1—2.

[Ред.] Очерки истории техники докапиталистических формаций. Изд. АН СССР, М.—Л., 462 стр.

[Ред.] Д. В. Ефремов и М. И. Радовский. Динамомашина в ее историческом развитии. Изд. АН СССР, Л., 560 стр.

Предисловие. — Там же, стр. 7—8.

[Ред.] Справочная книга для электротехников, т. 5 и 6. Изд. КУБУЧ, Л. (Совместно с М. А. Шателеном и В. А. Толвинским).

Предисловие. — Там же.

1937

Состояние исследовательской работы по магнитному анализу и магнитной дефектоскопии в СССР и ближайшие задачи ее развития. — Изв. АН СССР, ОТН, № 2, стр. 219—232.

По поводу статьи акад. А. Ф. Иоффе «О положении на философском фронте советской физики». — Под знаменем марксизма, № 11 и 12, стр. 144—156.

Михаил Фарадей — великий физик-материалист. (К 70-летию со дня смерти, 25 августа 1867 г. — 1937 г.). — Книга и пролетарская революция, № 7, стр. 109—115. (Совместно с М. И. Радовским).

[Ред.] Труды Ленингр. электротехн. инст. инженеров сигнализации и связи, в. 1. Трансжелдориздат, М., 160 стр. (Совместно с Е. Ф. Комарковым, В. Н. Листовым и И. И. Ивановым).

[Ред.] Н. Х. Прейпич. О методике скоростного составления предварительных сводных моментов и об экстраполяции поправок часов для нужд радиопередач времени. Изд. АН СССР, М.—Л., 35 стр.

[Ред.] Пионеры машинной индустрии. Изд. АН СССР, М.—Л., 204 стр.

1938

Электрическая энергия. Как она добывается, как она передается, как она потребляется. Изд. АН СССР, М.—Л., 296 стр.

Памяти В. К. Лебединского. — Электричество, № 5, стр. 67—68. (Совместно с М. А. Шателеном).

О современной борьбе материализма с идеализмом в области физики. — Под знаменем марксизма, № 8, стр. 111—127.

Значение книги Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» в современной борьбе с идеализмом в области физики. — Под знаменем марксизма, № 12, стр. 18—26.

Основные условия возникновения индуктированной электродвижущей силы. — Тезисы докладов на совещании по униполярным машинам и применению постоянных магнитов в электромашиностроении. Изд. АН СССР, М.—Л., стр. 3.

Обобщение великих открытий в естествознании. — Правда, 2 X, № 272.

Книга Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» и борьба с идеализмом в современной физике. — Учительская газета, 29 XI, № 161.

1939

Основные физические воззрения. (Сборник докладов и статей). Изд. 3, доп., АН СССР, М.—Л., 202 стр.

«Материализм и эмпириокритицизм» Ленина и современная физика. (Сборник статей). Соцэкгиз, М., 76 стр. (Совместно с С. И. Вавиловым и А. А. Максимовым).

Александр Степанович Попов — изобретатель радио. — Электричество, № 7, стр. 5—7. (Совместно с М. И. Радовским).

Значение книги Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» в современной борьбе с идеализмом в области физики. — Наука и жизнь, № 1, стр. 2—7.

Магнитный поток. Реальность или фикция. — Электроискра, 5 I, № 1.

Научная конференция на Ярославском электромашиностроительном заводе. — Машиностроение, 6 I, № 5. (Совместно с К. И. Шенфером).

Замечательный русский ученый. [К 80-летию со дня рождения А. С. Попова]. — Правда, 10 VI, № 159. (Совместно с М. И. Радовским).

1940

Объективная реальность магнитного потока. — Электричество, № 10, стр. 36—39.

Основные условия возникновения индуктированной электродвижущей силы. — Униполярные машины постоянных магнитов в электромашиностроении. Изд. АН СССР, М.—Л., стр. 5—16.

[Ред.] Д. К. Максвелл. Речи и статьи. ГТТИ, М.—Л., 226 стр.

Предисловие. Там же, стр. 5—7.

1941

Михаил Андреевич Шателен. (К 75-летию со дня рождения и 50-летию научно-педагогической, инженерно-технической и общественной деятельности). Юбилейная комиссия, Л., 19 стр. (Совместно с Б. Е. Воробьевым и В. П. Ивановым).

То же. — Изв. АН СССР, № 5, стр. 116—124.

Старейший русский электротехник. (К 75-летию со дня рождения М. А. Шателена). — Электричество, № 3, стр. 8—10. (Совместно с Я. А. Климовицким).

[Ред.] М. И. Радовский. Вениамин Франклин. (Краткий биографический очерк). Гос. энергоиздат, М.—Л., 80 стр.

Предисловие. — Там же, стр. 3—4.

1942

К вопросу о природе элементарных электрических зарядов. — ДАН СССР, т. 37, № 3, стр. 109—114.

1944

Из воспоминаний сотрудника журнала «Электричество». — Электричество, № 4, стр. 28—30.

Письмо в редакцию журнала «Электричество» по поводу статьи академика С. И. Вавилова «Ленин и современная физика». — Электричество, № 8—9, стр. 35.

[Ред.] Ф. Л. Вейтков. Летопись электричества. Детгиз, М.—Л., 295 стр. — Электричество, № 7, стр. 36—37.

1945

Международное признание А. С. Попова. — Электричество, № 3, стр. 42—44. (Совместно с М. И. Радовским).

А. С. Попов и русские общественные круги. — Электричество, № 4, стр. 2—5. (Совместно с М. И. Радовским).

Демонстрация первой радиотелеграфной установки. (Воспоминания). — Вестн. связи, № 5, стр. 8.

Изобретатель радио. — Краснофлотец, № 9, стр. 10.

1946

Магнитный поток и его преобразования. Изд. АН СССР, М.—Л., 358 стр.

Электрическая энергия. Как она добывается, как она передается, как она потребляется. Изд. 2, пересмотр. Госэнергоиздат, М.—Л., 312 стр.

Михаил Андреевич Шателен. (К 80-летию со дня рождения). — Изв. АН СССР, ОТН, № 1, стр. 5—12. (Совместно с Н. А. Шостьиным).

То же. — Электричество, № 1, стр. 42—45.

К статье А. И. Шальникова и Ю. В. Шарвина «Сверхпроводимость» (Электричество, 1946, № 1). — Электричество, № 6, стр. 81.

[Ред.] Шостьин Н. А. Михаил Андреевич Шателен. (К 80-летию со дня рождения). Госэнергоиздат, М.—Л., 48 стр.

1947

Глеб Максимилианович Кржижановский. (К 75-летию со дня рождения). — Электричество, № 1, стр. 4—6. (Совместно с А. В. Винтером).

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ И ДОКУМЕНТОВ О ЖИЗНИ И ТРУДАХ В. Ф. МИТКЕВИЧА

1926

П. Л. Калантаров. Владимир Федорович Миткевич как деятель высшей школы. — Электричество, № 10, стр. 417—418.

В. К. Лебединский. Владимир Федорович Миткевич. (К 30-летию научно-технической деятельности). — Электричество, № 10, стр. 416—417, портр.

М. А. Шателен. Владимир Федорович Миткевич. — Техн.-экон. вестн., т. 6, № 11, стр. 718—720, портр.

От редакции. [Приветствие редакции журнала «Электричество» в связи с 30-летием научной, технической и педагогической деятельности]. — Электричество, № 10, стр. 415—416.

1927

А. Ф. Иоффе и П. П. Лазарев. Записки об ученых трудах В. Ф. Миткевича. Изд. АН СССР, 6-я серия, № 18, стр. 1450—1952, список уч. тр. В. Ф. Миткевича — 26 назв.

1928

Кого выставляет Москва? [К выборам в Академию Наук СССР новых академиков]. — Известия, 3 VI, № 128.

А. А. Горев. В. Ф. Миткевич. — Лен. Правда, 7 X, № 234.

1929

В. Ф. Миткевич. — Торг.-пром. газета, 13 I, № 11, портр.

Электротехники — члены Всесоюзной Академии Наук. [Приветствие редакции журнала «Электричество»]. — Электричество, № 1—2, стр. 2, портр.

1930

А. Ф. Иоффе. Записка об ученых трудах профессора В. Ф. Миткевича. — Записки об ученых трудах действительных членов Академии Наук СССР по Отделению физико-математических наук, избранных 12 января 1924 г. Изд. АН СССР, стр. 105—108, список уч. тр. В. Ф. Миткевича — 30 назв.

1933

Приказ Революционного Военного Совета СССР по личному составу Армии. [Награждение орденом Красной Звезды]. — Правда, 23 II, № 53.

Новые заслуженные деятели науки и техники. [Миткевич В. Ф., Шателен М. А.]. — За индустриализацию, 17 XII, № 290, портр.

1938

Л. Б. Слепян. По поводу основных физических воззрений академика В. Ф. Миткевича и его оппонентов. — Под знаменем марксизма, № 1, стр. 178—182, литература в подстр. прим.

Миткевич Владимир Федорович. — БСЭ, т. 39, стлб. 508.

1943

Постановление Совета Народных Комиссаров Союза ССР «О присуждении Сталинских премий за выдающиеся работы в области науки за 1942 г.» — Правда, 24 III, № 79; — Известия, 23 III, № 68.

1945

Указ Президиума Верховного Совета СССР о награждении работников Академии Наук СССР. [Награждение орденом Трудового Красного Знамени]. — Правда, 15 VI, № 141; — Известия, 15 VI, № 139.

1947

Академику В. Ф. Миткевичу. [Приветствие редакции журнала «Электричество» в связи с 75-летием со дня рождения]. — Электричество, № 8, стр. 65.

М. А. Шателен. Владимир Федорович Миткевич. (К 75-летию со дня рождения). — Электричество, № 8, стр. 66—70, портр.

А. В. Винтер, Г. М. Кржижановский, В. П. Никитин, М. П. Костенко. Академик Владимир Федорович Миткевич. (К 75-летию со дня рождения). — Изв. АН СССР, ОТН, № 9, стр. 1057—1060.

П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Академик Владимир Федорович Миткевич. — Электричество, № 8, стр. 71—72. — Труды Ленингр. политехн. инст. им. М. И. Калинина, № 2, стр. 3—7, портр.

Указ Президиума Верховного Совета СССР о награждении Миткевича А. Ф. орденом Ленина. Правда, 30 VIII, № 227; — Известия, 30 VIII, № 204.

Приветствие академику В. Ф. Миткевичу. [От Отделения технических наук АН СССР и Энергетического института в связи с 75-летием со дня рождения]. — Изв. АН СССР, ОТН, № 9, стр. 1055—1056.

1948

Владимир Федорович Миткевич. (Материалы к библиографии ученых СССР). Изд. АН СССР, портр.

1951

Академик В. Ф. Миткевич. [Некролог]. Подписи: Президиум АН СССР, Министерство электропромышленности СССР, Министерство электростанций СССР, Отделение технических наук АН СССР. — Известия, 6 VI; — Вестн. АН СССР, № 7, стр. 94, портр.

Академик В. Ф. Миткевич. [Некролог]. Подписи: Редакция журнала «Вестник электропромышленности». — Вестник электропромышленности, № 6, стр. 24, портр.

Владимир Федорович Миткевич. [Некролог]. Подписи: Президиум АН СССР, Министерство электропромышленности СССР, Министерство электростанций СССР, Отделение технических наук АН СССР, Редакция журнала «Электричество», Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР, Секция по научной разработке проблем радиотехники АН СССР. — Электричество, № 7, стр. 3—4, портр.

1952

М. А. Шателен, Л. Р. Нейман, И. А. Зайцев, А. Г. Лурье. Выдающийся русский ученый-электрик академик Владимир Федорович Миткевич. (К годовщине со дня смерти). — Электричество, № 6, стр. 90—92, портр.

1953

В. И. Попов и Л. З. Сидлик. Об изобретении расщепленных проводов. [О приоритете В. Ф. Миткевича в этом вопросе на основании его статьи «Явления тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи]. — Электричество, № 8, стр. 67—69, литература — 7 назв.

1954

Миткевич Владимир Федорович. — БСЭ, 2-е изд., т. 27, стр. 599.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От редакции	3
Владимир Федорович Миткевич	5
Алюминиевый выпрямитель переменного тока и его применение	13
К вопросу об обратной электродвижущей силе вольтовой дуги	31
Применение алюминиевого конденсатора для получения «поющей» вольтовой дуги	36
О вольтовой дуге	39
Азотная кислота из воздуха	94
О горении воздуха в вольтовой дуге	102
Электроды-зонды для электрометрических работ с электролитами	143
К теории флюксметра Грассо	146
Явление тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи	154
Опыты намагничивания горных пород	187
К вопросу о применении намагничивания к опробованию бурых железняков	218
К вопросу о практических магнитных единицах	224
Состояние исследовательской работы по магнитному анализу и магнитной дефектоскопии в СССР и ближайшие задачи ее развития	235
Выступление на I Всесоюзной конференции по электропередаче больших мощностей на большие расстояния токами сверхвысоких напряжений	251
Список трудов В. Ф. Миткевича	256
Указатель литературы и документов о жизни и трудах В. Ф. Миткевича	264

В. МИТКЕВИЧЪ

О ВОЛЬТОВОЙ ДУГѢ.

Отдѣльный оттискъ
изъ «Извѣстій С.-Петербургскаго Политехническаго Института»
за 1905 г. Томъ IV.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ
1905.

Печатается по постановлению
редакционно-издательского Совета
Академии Наук СССР

*

Редактор издательства *А. А. Фролов*
Технический редактор *А. А. Кирнарская*
Корректоры *М. П. Казарновский* и *Л. А. Петрова*

*

РИСО АН СССР № 11—6В. Подписано к печати 15/X 1956 г. М33801. Бумага 60×92 1/16. Бум. л. 8 3/8. Печ. л. 16,75. Уч.-изд. л. 15,32 + 2 вкл. (0,08 уч.-изд. л.). Тираж 3000 экз.
Заказ № 3294. Цена 12 р. 80 к.

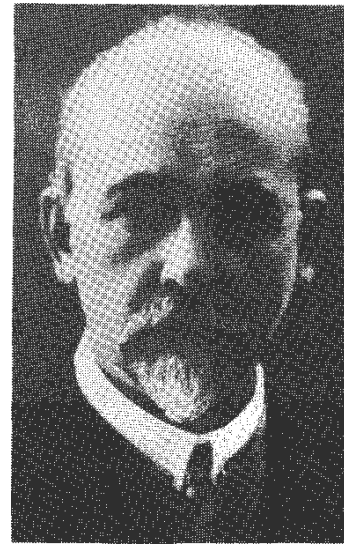
Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк, 2.

ОПЕЧАТКИ

Страница	*Строка*	*Напечатано*	*Следует читать*
178	3 снизу	$F_{\max} \frac{30 \cdot 273}{760}$	$F_{\max} = \frac{30 \cdot 273}{760}$
191	Поряд. № 4	Габоро	Габбро
200	„ № 182	об-ва	о-ва
258	14 снизу	№ 1370	№ 1371
260	25 сверху	совершенной	современной

МИТКЕВИЧ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ (22.07.1872—01.06.1951)

Автобиография



7 мая 1946 г.

Владимир Федорович Миткевич, сын священника, родился в г. Минске 3 августа* 1872 г. В 1891 г. окончил Минскую классическую гимназию. В 1895 г. окончил с дипломом 1-й степени физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета (по математическому отделению). В том же 1895 году, в августе, поступил на службу в Электротехнический институт в должности лаборанта по электротехнике, в каковой состоял по апрель 1901 г. С сентября 1896 г. сверх того занял должность ассистента по кафедре физики и электротехники в Горном институте, где состоял на службе по август 1905 г. За то же время исполнял обязанности лаборанта по физике на Высших женских курсах, с августа 1898 г. по август 1901 г., и в Санкт-Петербургском университете, с августа 1901 г. по август 1902 г.. С января 1902 г. был приглашен с Санкт-Петербургский политехнический институт на должность лаборанта по электротехнике для участия в оборудовании создаваемых лабораторий электромеханического факультета. С сентября 1904 г. занял должность преподавателя Санкт-Петербургского политехнического института и начал чтение лекций по теоретическим основам электротехники. Там же с сентября 1903 г. по май 1908 г. руководил упражнениями по теоретической механике.

В январе 1906 г. защитил в Санкт-Петербургском политехническом институте диссертацию под названием «О вольтовой дуге» и получил звание адъюнкта по электротехнике. В апреле того же 1906 года был избран профессором Санкт-Петербургского (ныне Ленинградского) политехнического института по кафедре теоретической электротехники, каковую бессменно занимал до 1938 г.

С сентября 1906 г. состоял профессором физики Высших женских поли-

* По старому стилю.

технических курсов, впоследствии во 2-м Политехническом институте. С 1911 по 1919 г. состоял консультантом аккумуляторного завода «Рекс».

С 1914 по 1919 г. состоял консультантом электротехнических заводов «Сименс и Гальске».

В 1917 г. состоя-л членом Совещания по электротехническим делам при Министерстве торговли и промышленности.

С 1918 по 1930 г. состоял членом Центрального электротехнического совета ВСНХ.

С 1918 по 1923 г. состоял заведующим отдела слабых токов в Государственном научно-техническом институте.

В 1921 г. принял участие в организации Особого технического бюро по военным изобретениям специального назначения и работал там непрерывно до 1937 г. Сначала занимал там должность заведующего физико-электротехнической частью, затем должность начальника 5-го отдела, а с 1932 г. состоял председателем Научно-технического совета.

В 1927 г. избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.[1]

В 1929 г. избран членом-корреспондентом Германского общества Elektrotechnischer Verein, от участия в котором отказался в 1937 г.

В 1929 г. избран действительным членом Академии наук СССР.[2]

С 1935 по 1939 г. состоял председателем Группы технической физики ОТЕН Академии наук СССР.

С 1939 по 1942 г. состоял директором Института усовершенствования при Всесоюзном научном инженерно-техническом обществе электриков (ВНИТОЭ).

С 1940 по 1942 г. состоял председателем секции электросвязи ОТЕН Академии наук СССР.

В 1933 г. награжден орденом Красной Звезды (№ 68) за ценные изобретения и конструкции в технике РККА, способствующие укреплению обороноспособности СССР.

В 1933 г. награжден грамотой ударника «За активное участие в реализации решений ЦИК СССР от 19 сентября 1932 г. „О высшей школе"».

В 1933 г. получил звание заслуженного деятеля науки и техники.

В 1934 г. удостоен повышенной персональной пенсии («принимая во внимание исключительные заслуги»).

За научные заслуги удостоен премии им. А. С. Попова (1907 г.), премии им. В. И. Ленина (в 1928 г.) и премии им. И. В. Сталина (1943 г.).

С целью изучения электротехники, для осмотра электротехнических установок и для участия в международных конгрессах совершил поездки за границу в Германию, Францию, Англию, Австрию, Швейцарию, Италию, Бельгию, Голландию, Данию, Швецию, Норвегию,, Северо-Американские Соединенные Штаты и Канаду в годы с 1893 по 1935 г.

В 1945 г. награжден почетной грамотой за работы в области измерительной техники.

10 июня 1945 г. в связи с 220-летием Академии наук СССР награжден

орденом Трудового Красного Знамени.

С 1939 по 1944 г. заведовал отделом теоретической электротехники Энергетического института Академии наук СССР.

С 1944 г. по настоящее время — директор Лаборатории приборостроения Московского отделения Менделеевского химического общества при Академии наук СССР.

В. Миткевич

ААН СССР, ф. 411, оп. 3, д. 145, л. 14—15. Подлинник.

. Ф. Миткевич — один из участников составления плана ГОЭЛРО, специалист по теории и физическим основам электротехники, передаче электроэнергии.

В 30-е годы В. Ф. Миткевич принял активное участие в физических дискуссиях, которые развернулись под углом критики теории относительности и положений квантовой механики якобы с позиций диалектического материализма. С. И. Вавилов, А. Ф. Иоффе, И. Е. Тамм, В. А. Фок, Я. И. Френкель и другие физики выступили против ошибочных физических воззрений В. Ф. Миткевича и солидаризовавшейся с ним группы физиков, среди которых наиболее активными были профессора А. К. Тимирязев и Н. П. Кастерин.

[1] В. Ф. Миткевич был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР по разряду физическому (физика) Отделения физико-математических наук.

[2] В. Ф. Миткевич избран в академики по специальности «энергетика» по Отделению физико-математических наук.

ЗАПИСКА ОБ УЧЕНЫХ ТРУДАХ ПРОФЕССОРА В. Ф. МИТКЕВИЧА

Январь 1927 г.

Профессор Владимир Федорович Миткевич родился в 1872 г. и в 1895 г. окончил физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета. Его деятельность протекала в Электротехническом и Горном, а затем в Политехническом институтах, где он в 1906 г. занял кафедру электротехники, возглавляемую им и до настоящего времени. В 1906 г. он получил звание адъюнкта, представив в качестве диссертации замечательное сочинение о вольтовой дуге, которое было затем удостоено премии им. А. С. Попова. Во время многочисленных заграничных поездок Владимир Федорович изучил положение многих электротехнических сооружений и организацию научных и научно-технических исследований в разных странах Европы и Америки.

Помимо научных и учебных работ, Владимир Федорович имел возможность применять свой обширный опыт и свои идеи в русской электротехнической промышленности в качестве члена Центрального электротехнического совета и научного консультанта на заводах.

Владимир Федорович является одним из лучших экспериментаторов-физиков, умеющим благодаря чрезвычайно ясной постановке вопроса и необычайной тонкости эксперимента разъяснять сложнейшие физические явле-

ния и в то же время находить пути к использованию их в технике. Таково его классическое исследование о вольтовой дуге, в котором он впервые провел последовательно электронную точку зрения и разъяснил механизм непонятного до тех пор явления. Таковы же и его работы об алюминиевом выпрямителе тока, выяснившие свойства и причины этого загадочного явления. Наконец, к той же категории необходимо отнести его крупное исследование о горении воздуха в вольтовой дуге, имевшее решающее значение как для выяснения самого процесса, так и для постановки промышленного использования азота воздуха.

Изучая физические процессы и их технические применения, мысль Владимира Федоровича в то же время проникает в самые общие проблемы физики. Таковы новая концепция электромагнитного поля, изложенная в статье о природе электрического тока, и работа его ученика Л. Б. Слепяна об униполярной индукции. Его курс «Магнетизм и электричество» представляет собой также оригинальное изложение вопроса. Список работ, приложенный в конце, характеризует Владимира Федоровича как лучшего представителя ученых, умеющего сочетать научную глубину и строгость своих исследований с техническим значением поставленных тем и полученных результатов.

Поэтому предлагаем избрать Владимира Федоровича членом-корреспондентом Академии наук СССР по физике.

А. Иоффе, П. Лазарев

ААН СССР, ф. 1, оп. la, д. 176. Приложение к § 28 протокола заседания ОС РАН 15 янваоя 1927 г.

Источник: Физики о себе. — Л.: Наука, 1990.

537
М.664

В. Ф. МИТКЕВИЧЪ

Магнитизмъ и Электричество

Э 123

В. Ф. МИТКЕВИЧЪ

Профессоръ СПБ. Политехническаго Института Императора Петра Великаго.

МАГНИТИЗМЪ
И
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Съ 111 рисунками.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ
ИЗДАНІЕ А. С. СУВОРИНА
1912

ПРОВЕРЕНО
VIII 1945

Государственная
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

ОВЕРЕНО
92310

44/82
1933

Типография А. С. Суворина. Эртелевъ, 13

ОГЛАВЛЕНІЕ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

Магнитное поле.

§§ СТРАН

1. Понятіе о магнитномъ полѣ 1
2. Законъ Кулона 3
3. Единица магнитной массы 6
4. Магнитная сила 7
5. Взглядъ Фарадэя на природу магнитнаго поля 10
6. Магнитная индукція 12
7. Магнитная проницаемость 13
8. Единица магнитной индукціи 15
9. Силовыя линіи магнитнаго поля 15
10. Линіи магнитной индукціи и магнитныя линіи 17
11. Магнитный потокъ 19
12. Единица магнитнаго потока 20
13. Непрерывность магнитнаго потока 20
14. Тѣла парамагнитныя и діамагнитныя 23
15. Магнитныя свойства желѣза. Гистерезисъ 25
16. Земное магнитное поле 26

ГЛАВА ВТОРАЯ.

Электрическій токъ. Основныя явленія.

17. Электромагнитная индукція тока 29
18. Проводники и непроводники 31
19. Характеристики электрической цѣпи: сила тока, электродвижущая сила и электрическое сопротивленіе 33
20. Законъ Ома 35
21. Магнитное поле тока 36
22. Направленіе тока и электродвижущей силы 37
23. Электромагнитная индукція. Направленіе тока и электродвижущей силы 40
24. Генераторы тока, основанные на явленіи электромагнитной индукціи 42

§§ стран.
25. Электромагниты 48
26. Электромагнитная сила 50
27. Гальваноскопы и гальванометры 55
28. Условія возникновенія электромагнитной индукціи тока 61
29. Законъ Ленца 62
30. Токи Фуко 65
31. Индукція тока токомъ 66
32. Обобщеніе закона Ленца 70
33. Механическія взаимодѣйствія токовъ 71

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

Сила тока.

34. Связь между электромагнитной силой и силой тока 76
35. Единицы силы тока 79
36. Измѣреніе силы тока. Амперметры 80
37. Количество электричества. Единица количества электричества 83
38. Постоянство силы установившагося тока для всѣхъ частей цѣпи . . 85
39. Связь между силою магнитнаго поля тока и силою тока 85
40. Законъ магнитной цѣпи 86

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

Электродвижущая сила.

41. Законъ электромагнитной индукціи 89
42. Единица электродвижущей силы 97
43. Электродвижущія силы взаимной индукціи 97
44. Электродвижущая сила самоиндукціи 105
45. Флюксметръ 109
46. Электродвижущая сила гальваническаго элемента 112
47. Электродвижущая сила термоэлемента 113
48. Внѣшняя электродвижущая сила, дѣйствующая между концами участка электрической цѣпи 115

ГЛАВА ПЯТАЯ.

Работа электрическаго тока.

49. Выводъ основного выраженія для работы 118
50. Единица работы тока 120
51. Второе опредѣленіе единицы электродвижущей силы 121

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

Разность потенціаловъ (Напряженіе).

52. Потенціалъ 123
53. Разность потенціаловъ (напряженіе) 125
54. Измѣреніе разности потенціаловъ. Вольтметръ 126

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

Мощность электрическаго тока.

§§ стран.
55. Выводъ выраженія для мощности тока 129
56. Единицы мощности тока и связанныя съ ними единицы работы . . 130
57. Измѣреніе мощности тока. Ваттметръ. 131

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

Электрическое сопротивленіе и законы распредѣленія токовъ.

58. Законъ Ома въ общемъ случаѣ 134
59. Единица электрическаго сопротивленія 136
60. Удѣльное сопротивленіе 137
61. Электрическая проводимость 139
62. Законы Кирхгофа 140
63. Измѣреніе электрическихъ сопротивленій 143
64. Группировка генераторовъ и пріемниковъ 151
65. Паденіе потенціала (напряженія) въ электрической цѣпи 160

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

Тепловыя дѣйствія тока.

66. Нагрѣваніе проводниковъ токомъ. Законъ Джуля 167
67. Приложеніе тепловыхъ дѣйствій тока 169
68. Явленіе Пельтье 175
69. Явленіе Томсона 176

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

Перемѣнный режимъ въ электрической цѣпи.

70. Прекращеніе постояннаго тока 178
71. Установленіе постояннаго тока 182
72. Накопленіе энергіи въ электрической цѣпи при установленіи тока . 187
73. Возникновеніе перемѣнной электродвижущей силы 190
74. Перемѣнный токъ въ цѣпи съ сопротивленіемъ и самоиндукціей . . 195
75. Мощность перемѣннаго тока. Дѣйствующая сила тока. Дѣйствующая электродвижущая сила 203

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

Электрическое поле.

76. Основныя явленія 213
77. Электроскопъ 218
78. Законъ Кулона 219
79. Электростатическая единица количества электричества 219

§§ СТРАН.
80. Электрическая сила поля 220
81. Потенціалъ 221
82. Электрическое поле съ фарадэевской точки зрѣнія 223
83. Распредѣленіе электричества на проводящихъ тѣлахъ 228
84. Электризація черезъ вліяніе 229
85. Емкость. Единицы емкости 232
86. Энергія заряда 235
87. Соотношеніе между электрическимъ полемъ и полемъ магнитнымъ . 236

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

Электрическія колебанія.

88. Перемѣнный токъ въ цѣпи съ самоиндукціей и емкостью 239
89. Резонансъ 242
90. Свободныя колебанія въ электрической цѣпи 244
91. Электромагнитныя волны 247

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

Электролизъ.

92. Общій характеръ явленія 251
93. Законы Фарадэя 252
94. Вольтаметръ 254
95. Конвекціонная теорія электролиза 255
96. Электродвижущая сила поляризаціи 255
97. Электрическій аккумуляторъ 256

ОТЪ АВТОРА.

Расположеніе, принятое въ настоящемъ курсѣ Магнитизма и Электричества, нѣсколько отличается отъ обычнаго. Въ основаніе ученія объ электрическомъ токѣ здѣсь положено явленіе электромагнитной индукціи и магнитное поле тока. Авторъ руководствовался при этомъ, между прочимъ, слѣдующими соображеніями. Въ явленіи индукціи особенно отчетливо проявляется электромагнитная инерція, порождающая силы реакціи электрическаго или механическаго характера и являющаяся самымъ общимъ свойствомъ цѣпи тока. Далѣе, магнитное поле тока должно быть разсматриваемо, какъ наиболѣе существенный признакъ электрическаго тока: послѣдній можетъ не сопровождаться тепловыми, химическими и т. п. дѣйствіями, но мы не можемъ себѣ представить тока, несопутствуемаго магнитнымъ полемъ. Авторъ полагаетъ, наконецъ, что принятое имъ расположеніе матеріала представляетъ нѣкоторыя преимущества и въ педагогическомъ отношеніи, такъ какъ при этомъ оказывается возможнымъ выдвинуть на первый планъ многія основныя свойства электрическаго тока.

Содержаніе настоящей книги представляетъ собою лекціи, читанныя на С.-Петербургскихъ Высшихъ Женскихъ Политехническихъ Курсахъ съ 1907 по 1911 годъ слушательницамъ младшихъ семестровъ. Въ виду послѣдняго обстоятельства авторъ при изложеніи пользуется лишь элементами исчисленія безконечно малыхъ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

Магнитное поле.

---

1. Понятіе о магнитномъ полѣ.—Еще въ глубокой древности было извѣстно о существованіи камней, способныхъ притягивать къ себѣ куски желѣза. Такіе камни получили названіе *магнитовъ*, повидимому, по имени мѣстности *Магнезія* въ Малой Азіи, гдѣ они добывались. Въ настоящее время подобные *естественные магниты* находятъ во многихъ мѣстахъ земного шара. Они представляютъ собою не что иное, какъ соединеніе желѣза съ кислородомъ (Fe_3O_4) — такъ называемый *магнитный желѣзнякъ*.

Если кусокъ стали натереть естественнымъ магнитомъ, то онъ самъ пріобрѣтаетъ свойства магнита: начинаетъ притягивать желѣзо. Такимъ образомъ получается *искусственный магнитъ*.

Ближайшее изученіе магнитовъ показываетъ, что свойство притягивать желѣзо распредѣлено по поверхности ихъ неравномѣрно. Нѣкоторыя части ихъ поверхности обладаютъ этимъ свойствомъ въ сильной степени, другія — наоборотъ — совсѣмъ не притягиваютъ. Части поверхности магнита, въ которыхъ сосредоточено свойство притягивать желѣзо, обыкновенно называютъ *полюсами магнита* или *магнитными полюсами*. Число полюсовъ магнита можетъ быть сколько угодно велико, но опытъ показываетъ, что оно никогда не можетъ быть меньше двухъ. Такимъ образомъ магнитъ о двухъ полюсахъ является наиболѣе простой комбинаціей, и потому мы въ дальнѣйшемъ, при изученіи законовъ магнитизма, будемъ разсматривать и имѣть въ виду именно магниты о двухъ полюсахъ.

Для приготовленія искусственныхъ магнитовъ о двухъ полюсахъ обыкновенно берутъ сталь въ видѣ полосъ. Послѣ *надлежащаго* натиранія ихъ естественными магнитами, т. е. послѣ *намагниченія*, получаютъ такъ называемые *полосовые магниты*, характерною особенностью которыхъ является то обстоятельство, что концы ихъ оказываются въ то же время и ихъ полюсами. Иногда подобныя стальныя полосы сгибаютъ въ видѣ подковы, и тогда получаютъ *подковообразные магниты*, полюса которыхъ болѣе или менѣе сближены.

Опытъ показываетъ, что полосовой магнитъ, будучи подвѣшенъ горизонтально такъ, чтобы могъ свободно вращаться вокругъ вертикальной оси, принимаетъ постоянное направленіе въ пространствѣ, одинаковое для всѣхъ магнитовъ въ данной мѣстности. Это направленіе почти совпадаетъ съ линіей, идущей съ сѣвера на югъ. При этомъ къ сѣверу обращается всегда одинъ и тотъ же конецъ. Его называютъ поэтому *сѣвернымъ полюсомъ*. Другой же конецъ, всегда обращающійся къ югу, называютъ *южнымъ полюсомъ*. Такимъ образомъ мы видимъ, что два полюса магнита не вполнѣ тождественны. Для распознаванія ихъ обыкновенно сѣверный полюсъ отмѣчаютъ буквой N, а южный — буквой S. Описываемое свойство магнитовъ было первымъ, которое использовано человѣчествомъ для практическихъ цѣлей: повидимому, уже за нѣсколько сотъ лѣтъ до нашей эры китайцы пользовались *магнитными стрѣлками*, какъ указателями пути въ морѣ.

Дальнѣйшее изученіе магнитовъ приводитъ насъ къ новымъ ихъ свойствамъ и къ новымъ указаніямъ на разнородность ихъ полюсовъ. Оказывается, что полюса двухъ магнитовъ механически взаимодѣйствуютъ другъ съ другомъ. При этомъ, если одинъ магнитъ сдѣлать подвижнымъ и подносить къ нему другой, то увидимъ, что сѣверный полюсъ перваго магнита притягивается къ южному полюсу второго и отталкивается отъ сѣвернаго (рис. 1). Наоборотъ, южный полюсъ перваго магнита притягивается къ сѣверному и отталкивается отъ южнаго полюса второго магнита. Формулируя законъ механическаго взаимодѣйствія магнитныхъ полюсовъ, мы можемъ сказать:

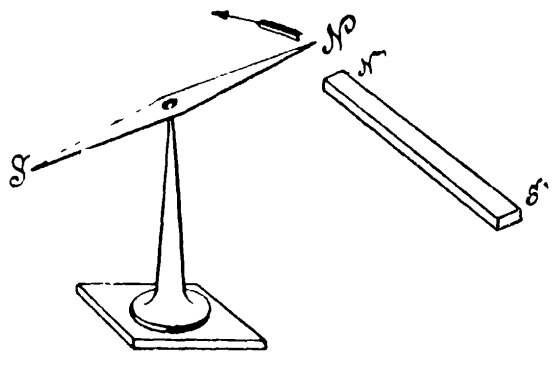


Рис. 1.

Два одноименныхъ полюса взаимно отталкиваются и два разноименныхъ полюса—притягиваются.

Свойство магнита дѣйствовать механически на куски желѣза или на полюса другого магнита проявляется не только въ томъ случаѣ, когда куски желѣза или полюса другого магнита непосредственно прикасаются къ полюсамъ даннаго магнита. Механическія дѣйствія наблюдаются и тогда, когда между ними имѣется нѣкоторое разстояніе. Дѣйствіе даннаго магнита обнаруживается не только непосредственно у его поверхности, но во всемъ пространствѣ, окружающемъ его. Такимъ образомъ, мы можемъ вообще сказать, что *магнитныя явленія* наблюдаются въ пространствѣ, окружающемъ магниты. Это пространство называется *магнитнымъ полемъ*.

2. Законъ Кулона.—Въ наукѣ долгое время господствовалъ тотъ взглядъ, согласно которому всѣ явленія, въ магнитномъ полѣ наблюдаемыя, объясняются *дальнодѣйствіемъ*, т. е. дѣйствіемъ на разстояніи нѣкоторыхъ гипотетическихъ дѣятелей, находящихся въ тѣхъ мѣстахъ, съ которыми мы геометрически связываемъ наблюдаемыя явленія. Эти гипотетическіе дѣятели, обусловливающіе свойства магнитнаго поля, называются *магнитными массами*. Мы должны мысленно размѣстить ихъ на концахъ магнита, ибо концы магнита являются геометрическими центрами наблюдаемыхъ явленій. Такимъ образомъ, магнитными полюсами мы называемъ вообще тѣ части поверхности магнита, на которыхъ распредѣлены магнитныя массы. Въ болѣе точномъ геометрически смыслѣ обыкновенно, однако, подъ именемъ полюсовъ разумѣютъ тѣ точки, которыя являются центрами магнитныхъ массъ въ томъ же смыслѣ, въ какомъ центръ тяжести является центромъ вѣсомой массы, образующей тѣло. Въ случаѣ очень длиннаго тонкаго магнита, напримѣръ намагниченной стальной проволоки, мы можемъ съ очень большою степенью точности считать, что геометрическіе полюса лежатъ какъ разъ на концахъ.

Само собою разумѣется, что съ разсматриваемой точки зрѣнія мы должны допустить существованіе магнитныхъ массъ двухъ родовъ соотвѣтственно двумъ разнороднымъ концамъ магнита. Мы должны это сдѣлать, если желаемъ объяснять свойство концовъ магнита, какъ результатъ существованія на нихъ магнитныхъ массъ. Слѣдовательно, мы приходимъ къ представленію о *сѣверной магнитной массѣ*, расположенной на сѣвер-

номъ полюсѣ, и *южной магнитной массѣ*, расположенной на южномъ полюсѣ магнита. Приписывая сѣверной и южной магнитнымъ массамъ діаметрально противоположныя свойства, мы можемъ проще всего выразить это математическимъ языкомъ. Именно мы приписываемъ одной массѣ знакъ (+), другой — знакъ (—). Условно принимаютъ, что сѣверная магнитная масса есть *масса положительная*, а южная—*отрицательная*.

Объясняя механическія взаимодѣйствія полюсовъ двухъ магнитовъ и основываясь на точкѣ зрѣнія дальнодѣйствія, мы можемъ говорить, что одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются по той причинѣ, что сосредоточенныя въ нихъ массы взаимно отталкиваются, когда онѣ одноименны, и притягиваются, когда разноименны.

Величина силы взаимодѣйствія двухъ магнитныхъ массъ будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше взаимодѣйствующія массы. Въ этомъ нетрудно убѣдиться изъ опыта. Если, напримѣръ, мы имѣемъ три магнита N_1S_1, N_2S_2 и N_3S_3 (рис. 2) и если полюса N_1 и N_2, будучи на одномъ и томъ же разстояніи отъ полюса N_3 и при однихъ и тѣхъ же условіяхъ, отталкиваются отъ него порознь съ одною и тою же силою, то мы должны заключить, что магнитныя массы, лежащія на концахъ N_1 и N_2, равны между собою. Очевидно, что если мы сложимъ магниты N_1S_1 и N_2S_2 такъ, чтобы N_1 совпало съ N_2 и S_1 съ S_2, то получимъ новый магнитъ, полюсъ котораго N будетъ обладать вдвое большей магнитной массой. Опытъ показываетъ, что этотъ полюсъ N новаго сложнаго магнита, будучи расположенъ на прежнемъ разстояніи отъ полюса N_3 и при прочихъ равныхъ условіяхъ, отталкивается съ силою въ два раза большею, чѣмъ это было раньше. Изслѣдуя далѣе порознь притягательныя силы сначала между S_1 и N_3, а затѣмъ между S_2 и N_3, въ обоихъ случаяхъ при равныхъ разстояніяхъ, мы найдемъ, что силы эти тождественны. Слѣдовательно и магнитныя массы S_1 и S_2 равны между собою. Сложивъ, наконецъ, магниты N_1S_1 и N_2S_2 и измѣривъ силу, съ которою полюсъ N_3 притягиваетъ сложенные вмѣстѣ полюса S_1 и S_2, будучи на томъ же разстояніи отъ нихъ и при прочихъ равныхъ условіяхъ, мы найдемъ, что и

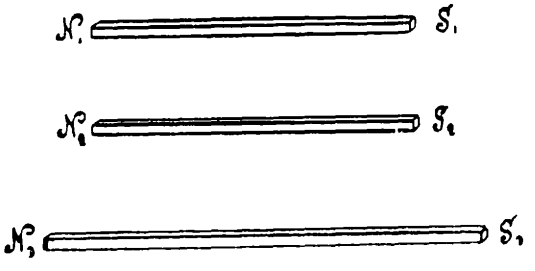


Рис. 2.

въ случаѣ притяженія сила стала вдвое больше при увеличеніи вдвое одной изъ взаимодѣйствующихъ массъ. Отсюда заключаемъ, что *сила взаимодѣйствія двухъ полюсовъ должна быть прямо-пропорціональна магнитнымъ массамъ этихъ полюсовъ.*

Изъ только что описаннаго опыта мы можемъ между прочимъ убѣдиться еще въ томъ, что притягательная сила между полюсами S_1 и N_3 равна по величинѣ отталкивательной силѣ между полюсами N_1 и N_3, если, конечно, разстоянія между ними одинаковы. Слѣдовательно, *магнитныя массы, расположенныя на двухъ полюсахъ одного магнита, будучи обратны по знаку, равны по абсолютной величинѣ.*

Продолжая изслѣдованіе силы взаимодѣйствія двухъ магнитныхъ массъ, легко убѣдиться, что сила эта зависитъ еще отъ величины разстоянія между ними. Именно оказывается, что, увеличивая разстояніе между ними, мы получаемъ силу взаимодѣйствія все меньшую и меньшую. Увеличивая разстояніе въ 2, 3, 4 и т. д. раза, мы уменьшаемъ силу въ 4, 9, 16 и т. д. разъ. Эта зависимость силы отъ разстоянія была доказана впервые опытами Кулона, детально обслѣдовавшаго законъ механическаго взаимодѣйствія магнитныхъ полюсовъ. Итакъ *законъ Кулона* выражается слѣдующимъ образомъ:

Величина силы взаимодѣйствія двухъ магнитныхъ массъ прямопропорціональна произведенію этихъ массъ и обратно-пропорціональна квадрату разстоянія между ними.

Если величины двухъ магнитныхъ массъ обозначимъ черезъ m_1 и m_2, разстояніе между ними — черезъ d, силу взаимодѣйствія—черезъ f и черезъ k—коэффиціентъ пропорціональности, то получаемъ слѣдующую математическую формулировку закона Кулона:

$$f = k\frac{m_1 m_2}{d^2}.$$

Сила взаимодѣйствія всегда направлена вдоль прямой, соединяющей массы.

Опытъ показываетъ, что эта сила зависитъ отъ природы вещества, заполняющаго пространство, въ которомъ находятся взаимодѣйствующія магнитныя массы. Слѣдовательно, мы должны считать коэффиціентъ k зависящимъ отъ свойствъ среды.

Коэффиціентъ k принимается обыкновенно положительнымъ. Въ такомъ случаѣ, какъ видно изъ формулы Кулона, сила взаи-

модѣйствія будетъ положительна въ случаѣ одноименныхъ массъ и отрицательна въ случаѣ разноименныхъ. Другими словами, при принятыхъ нами условіяхъ отталкивательная сила будетъ положительна, а сила притягательная—отрицательна.

3. Единица магнитной массы.—Законъ Кулона позволяетъ намъ установить единицу для измѣренія магнитной массы. Дѣйствительно, законъ этотъ связываетъ между собою механическую силу, взаимодѣйствующія магнитныя массы и разстояніе между ними. Для измѣренія механической силы и разстоянія мы можемъ взять тѣ или иныя общепринятыя единицы. Въ наукѣ обыкновенно пользуются для этого такъ называемой *абсолютной системой единицъ*, въ основаніи которой лежатъ: единица длины — сантиметръ, единица массы — граммъ, единица времени — секунда. И сама абсолютная система въ виду этого часто именуется *системой сантиметръ-граммъ-секунда* или просто *системой CGS*. Итакъ, принимая абсолютную систему единицъ, мы будемъ выражать механическую силу въ динахъ, а разстояніе въ сантиметрахъ. Если теперь, исходя изъ тѣхъ или иныхъ соображеній, мы придадимъ нѣкоторое совершенно опредѣленное значеніе коэффиціенту пропорціональности k, то очевидно, что въ такомъ случаѣ мы себя связываемъ въ выборѣ единицы для измѣренія магнитной массы. Мы уже не можемъ избрать какую угодно единицу—она прямо вытекаетъ изъ формулы Кулона.

Для пустоты принимаютъ въ формулѣ Кулона:

$$k = 1.$$

Съ очень большою степенью точности это справедливо и для воздуха.

Въ такомъ случаѣ формула Кулона пріобрѣтаетъ слѣдующій видъ:

$$f = \frac{m_1 m_2}{d^2}.$$

Допустимъ теперь, что магнитныя массы m_1 и m_2 равны между собою, т. е.:

$$m_1 = m_2 = m,$$

и что кромѣ того онѣ подобраны такимъ образомъ, чтобы при разстояніи между ними въ 1 сантиметръ, т. е. при

$$d = 1 \text{ см.}$$

сила взаимодѣйствія равнялась какъ разъ одной динѣ, т. е.

$$f = 1 \text{ динѣ}.$$

Очевидно мы будемъ имѣть въ этомъ случаѣ такое соотношеніе:

$$1 = \frac{m^2}{1}.$$

Откуда:

$$m = \pm 1.$$

Такимъ образомъ оказывается, что при принятыхъ нами условіяхъ каждая изъ взаимодѣйствующихъ массъ численно равна единицѣ.

На основаніи вышеизложеннаго получаемъ слѣдующее опредѣленіе единицы магнитной массы (въ абсолютной системѣ единицъ):

Единицей магнитной массы называется такая магнитная масса, которая отталкивается въ пустотѣ съ силою, равною одной динѣ, отъ другой такой же массы, расположенной на разстояніи одного сантиметра отъ первой.

4. Магнитная сила.—Какъ мы уже упоминали выше, во всемъ пространствѣ, окружающемъ магнитъ и называемомъ магнитнымъ полемъ, проявляется дѣйствіе этого магнита. Въ какой бы точкѣ магнитнаго поля мы не помѣстили полюсъ другого магнита, скажемъ какую нибудь магнитную массу, эта послѣдняя всегда будетъ испытывать въ большей или меньшей степени механическое дѣйствіе со стороны даннаго магнита. При описаніи этого явленія мы можемъ сдѣлать шагъ впередъ и говорить просто, что магнитное поле даннаго магнита дѣйствуетъ механически на всякую магнитную массу, въ немъ помѣщенную. Мы можемъ даже отвлечься отъ магнита, съ которымъ органически связано магнитное поле, и говорить, что вообще *магнитное поле дѣйствуетъ механически на магнитную массу, внесенную въ него.* Такимъ образомъ мы переходимъ къ изученію магнитнаго поля, какъ такового, независимо отъ тѣхъ магнитовъ или какихъ либо иныхъ дѣятелей, съ которыми оно можетъ быть неразрывно связано.

Механическую силу, съ которою магнитное поле дѣйствуетъ на нѣкоторую магнитную массу, помѣщенную въ данной точкѣ, можно разсматривать, какъ характеристику поля въ этой точкѣ. Для большей опредѣленности и общности результатовъ обы-

кновенно въ этомъ случаѣ берутъ не какую либо произвольную магнитную массу, а всегда *единицу сѣверной магнитной массы*, т. е. положительную единицу магнитной массы. Соотвѣтствующую же механическую силу называютъ *силою магнитнаго поля* или просто *магнитною силою*.

Итакъ, *силою магнитнаго поля или магнитною силою въ данной точкѣ называютъ ту силу, съ которою магнитное поле дѣйствуетъ на помѣщенную въ этой точкѣ единицу сѣверной магнитной массы.*

Должно замѣтить, что механическая сила, съ которою поле дѣйствуетъ на магнитную массу, зависитъ, какъ было указано выше въ § 2, отъ природы среды. Въ виду этого ради той же общности и сравнимости результатовъ при опредѣленіи магнитной силы принимаютъ, что въ пространствѣ нѣтъ обычной матеріи. Такимъ образомъ, данное выше опредѣленіе абсолютно справедливо, когда мы имѣемъ магнитное поле въ пустотѣ, и весьма близко къ истинѣ въ случаѣ, если магнитное поле заполнено воздухомъ, какъ это практически въ большинствѣ случаевъ и бываетъ. Вообще же при опредѣленіи магнитной силы слѣдуетъ представить себѣ, что при неизмѣнномъ распредѣленіи магнитныхъ массъ въ полѣ все вещество, заполняющее его, замѣнено пустотой.

Въ дальнѣйшемъ мы будемъ обозначать магнитную силу поля буквой H.

Магнитная сила H въ данной точкѣ поля есть векторъ, т. е. величина, имѣющая направленіе. При оперированіи съ магнитною силою это всегда нужно имѣть въ виду.

Въ простѣйшемъ случаѣ, когда мы имѣемъ поле вокругъ обыкновеннаго полосового магнита, магнитную силу въ данной точкѣ мы должны разсматривать, какъ геометрическую сумму двухъ слагаемыхъ, каждая изъ которыхъ есть магнитная сила, производимая въ данной точкѣ каждымъ изъ двухъ полюсовъ въ отдѣльности. На рис. 3 H_N представляетъ собою по величинѣ и направленію магнитную силу въ точкѣ A, производимую полюсомъ N магнита NS. Если обозначить черезъ m магнитную массу, лежащую на каждомъ изъ

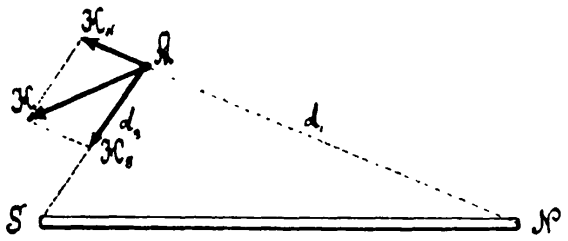


Рис. 3.

полюсовъ, а разстояніе точки A отъ полюса N черезъ d_1, то, очевидно, имѣемъ согласно опредѣленію:

$$H_N = \frac{m}{d_1^2}.$$

H_S есть магнитная сила, обусловливаемая въ той же точкѣ полюсомъ S. Аналогичнымъ образомъ, она выражается такъ:

$$H_S = \frac{m}{d_2^2}.$$

Діагональ параллелограмма, построеннаго на H_N и H_S, какъ на сторонахъ, представляетъ собою геометрическую сумму этихъ двухъ слагаемыхъ векторовъ и есть какъ разъ результирующая или полная магнитная сила въ точкѣ A. Въ общемъ случаѣ, когда магнитное поле обусловливается присутствіемъ цѣлаго ряда магнитовъ, магнитная сила въ каждой точкѣ поля есть геометрическая сумма многихъ составляющихъ, соотвѣтствующихъ отдѣльнымъ магнитнымъ массамъ.

Если во всѣхъ точкахъ поля магнитная сила одна и та же по величинѣ и направленію, то такое поле называется *однороднымъ*. Въ противномъ случаѣ оно называется *неоднороднымъ*.

Что касается практическихъ пріемовъ, служащихъ для опредѣленія направленія магнитной силы въ данной точкѣ, то въ этомъ отношеніи самымъ простымъ и распространеннымъ методомъ является примѣненіе магнитной стрѣлки, легко подвижной вокругъ центра тяжести. Подобная стрѣлка, будучи помѣщена, напримѣръ, въ однородное поле, оказывается подверженной дѣйствію пары силъ ff (фиг. 4), стремящихся повернуть ее, ибо къ сѣверному концу будетъ приложена механическая сила, направленная вдоль магнитной силы поля, а къ южному концу — сила, направленная обратно магнитной силѣ поля. Очевидно стрѣлка можетъ быть въ состояніи покоя только въ томъ случаѣ, когда моментъ этой пары силъ будетъ равенъ нулю. А подобное условіе будетъ удовлетворено, когда стрѣлка, повернувшись, направится вдоль магнитной силы (рис. 5). Такимъ образомъ направленіе, указываемое сѣвернымъ концомъ пришедшей въ равновѣсіе ма-

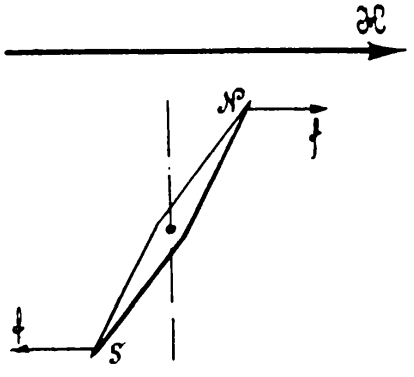


Рис. 4.

гнитной стрѣлки, какъ разъ есть направленіе магнитной силы въ данной точкѣ поля. Въ случаѣ неоднороднаго магнитнаго поля нужно только взять магнитную стрѣлку достаточно малой величины, такъ, чтобы участокъ поля, занимаемый стрѣлкой, можно было разсматривать, какъ однородное поле. И тогда направленіе магнитной стрѣлки можно съ большою степенью точности принимать за направленіе силы неоднороднаго магнитнаго поля въ точкѣ, занимаемой центромъ стрѣлки.

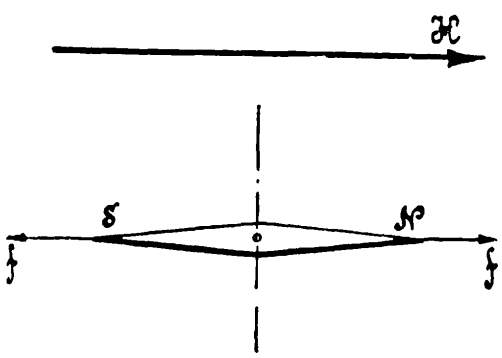


Рис. 5.

Согласно опредѣленію H есть механическая сила, дѣйствующая въ данной точкѣ на *единицу* магнитной массы. Ясно, конечно, что сила, приложенная къ магнитной массѣ m, представится такъ:

$$f = mH.$$

При принятыхъ нами единицахъ эта сила выразится въ динахъ.

5. Взглядъ Фарадэя на природу магнитнаго поля.—До сихъ поръ, говоря о магнитномъ полѣ, мы основывались на точкѣ зрѣнія, допускающей дѣйствіе на разстояніе гипотетическихъ магнитныхъ массъ. Но существуетъ еще другой взглядъ на явленія, происходящія въ магнитномъ полѣ. Онъ развился главнымъ образомъ благодаря трудамъ Фарадэя. Этотъ великій естествоиспытатель не могъ себѣ представить, чтобы магнитная масса могла дѣйствовать на разстояніи, т. е. тамъ, гдѣ ея нѣтъ. Съ фарадэевской точки зрѣнія явленія, въ магнитномъ полѣ наблюдаемыя, могутъ и должны быть объяснены только тѣмъ, что въ этомъ полѣ происходитъ какой-то процессъ какъ разъ въ томъ мѣстѣ, гдѣ характерное явленіе наблюдается. Если, напримѣръ, намъ кажется, что полюсъ A притягивается къ полюсу B, то это значитъ, что въ томъ мѣстѣ поля, гдѣ находится полюсъ A, происходитъ какой-то особый процессъ, результатомъ котораго являются чисто механическія силы, толкающія A по направленію къ B.

Цѣлый рядъ явленій подтверждаетъ мысль о томъ, что во всемъ пространствѣ, именуемомъ магнитнымъ полемъ, среда находится въ какомъ-то деформированномъ состояніи, которое нужно признать слѣдствіемъ происходящаго въ ней процесса. Дѣй-

ствительно, магнитное поле измѣняетъ всѣ или почти всѣ физическія свойства внесенныхъ въ него тѣлъ. Такъ, напримѣръ, кусокъ мягкаго желѣза, будучи помѣщенъ въ магнитное поле, намагничивается, т. е. самъ становится магнитомъ, при чемъ однако это новое состояніе желѣза тотчасъ же прекращается, какъ только мы вынесемъ его изъ предѣловъ магнитнаго поля. Размѣры многихъ тѣлъ замѣтно измѣняются въ магнитномъ полѣ. Однимъ изъ самыхъ характерныхъ для магнитнаго поля явленій представляется открытое Фарадэемъ *магнитное вращеніе плоскости поляризаціи*. Всѣ тѣла при внесеніи въ магнитное поле пріобрѣтаютъ способность вращать плоскость поляризаціи свѣта, до извѣстной степени аналогично тому, что происходитъ нормально въ кварцѣ. Упомянемъ еще о свойствѣ магнитнаго поля измѣнять качество свѣта, испускаемаго помѣщеннымъ въ него источникомъ (явленіе Зеемана).

Мы не будемъ перечислять здѣсь всѣхъ безъ исключенія свойствъ магнитнаго поля. Важно только констатировать фактъ большого разнообразія тѣхъ измѣненій, которыя претерпѣваютъ всѣ тѣла при внесеніи ихъ въ магнитное поле. Отсюда совершенно ясна затруднительность объясненія всѣхъ проявленій магнитнаго поля особыми свойствами магнитныхъ массъ, дѣйствующихъ на разстояніи, и очевидна необходимость допустить, что въ самомъ магнитномъ полѣ происходитъ нѣкоторый процессъ. Механизмъ этого процесса, его природа намъ неизвѣстны. Ближайшее изученіе всѣхъ магнитныхъ явленій заставляетъ признать, что этотъ процессъ происходитъ независимо отъ того, имѣемъ ли мы магнитное поле въ пустотѣ или въ какой-либо матеріальной средѣ. Слѣдовательно, то, что мы называемъ «пустотой», только кажется намъ таковой. Въ дѣйствительности надо предположить, что такъ называемое пустое пространство чѣмъ-то заполнено. Это нѣчто называютъ *эоиромъ*. Его разсматриваютъ, какъ какое-то особое непосредственно нами не осязаемое вещество, заполняющее все міровое пространство и проникающее чрезъ всѣ тѣла природы. Итакъ, мы можемъ принять, что во всякомъ магнитномъ полѣ въ эоирѣ происходитъ нѣкоторый магнитный процессъ и самый эоиръ находится въ особомъ деформированномъ состояніи. Если, кромѣ того, въ магнитномъ полѣ присутствуетъ обычная матерія, то и она приходитъ въ вынужденное деформированное состояніе, которое выражается въ измѣненіи свойствъ этой матеріи.

По Фарадэю, магнитныя массы, къ представленію о которыхъ мы приходимъ, основываясь на точкѣ зрѣнія дальнодѣйствія, въ дѣйствительности не существуютъ; онѣ представляютъ собою нашу фикцію, созданную для того, чтобы удобнѣе описывать механическія проявленія магнитнаго поля. Не слѣдуетъ, однако, изъ этого заключать, что законъ Кулона, въ основаніи котораго лежитъ понятіе о магнитной массѣ, совершенно уничтожается точкой зрѣнія Фарадэя. Слѣдуетъ лишь помнить, что законъ Кулона ничего не говоритъ намъ о природѣ механическихъ проявленій магнитнаго поля, что онъ только описываетъ явленія и даетъ совершенно точное съ формальной стороны соотношеніе, которое во всякомъ случаѣ остается весьма цѣннымъ при изученіи магнитнаго поля. Съ фарадэевской точки зрѣнія, *все происходитъ такъ, какъ будто бы существуютъ магнитныя массы, взаимодѣйствующія согласно закону Кулона.*

При изслѣдованіи магнитнаго поля и изученіи его свойствъ можно было бы, собственно говоря, исходить изъ какого угодно характернаго явленія, въ немъ наблюдаемаго. Можно было бы, напримѣръ, исходить изъ магнитнаго вращенія плоскости поляризаціи и т. п. Чисто исторически объясняется то обстоятельство, что мы характеризуемъ магнитное поле при помощи понятій, вытекающихъ изъ разсмотрѣнія его механическихъ проявленій.

6. Магнитная индукція.—Какъ мы уже упоминали выше, намъ неизвѣстна истинная природа того процесса, который происходитъ въ магнитномъ полѣ и который обусловливаетъ въ средѣ магнитную деформацію. Мы можемъ однако изслѣдовать эту деформацію по различнымъ ея проявленіямъ. Изучая ихъ, не трудно подмѣтить нѣкоторыя характерныя ея особенности. Обратимся для начала къ отчасти знакомымъ уже намъ механическимъ дѣйствіямъ магнитнаго поля на внесенный въ него полюсъ магнита. Къ этому полюсу оказывается приложенной механическая сила, стремящаяся двигать его въ нѣкоторомъ совершенно опредѣленномъ направленіи. Остановимся теперь на магнитномъ вращеніи плоскости поляризаціи. Если мы внесемъ въ магнитное поле отшлифованный шаръ изъ совершенно однороднаго и изотропнаго стекла и будемъ пропускать плоско-поляризованный лучъ свѣта вдоль различныхъ его діаметровъ, то мы увидимъ, что вдоль одного совершенно опредѣленнаго направленія вращеніе плоскости поляризаціи окажется максимальнымъ, по мѣрѣ

уклоненія луча отъ этого направленія вращеніе становится все меньше и меньше и наконецъ въ направленіи перпендикулярномъ вращенію будетъ равно нулю. Опытъ показываетъ, что и всѣ другія свойства магнитнаго поля, разсматриваемыя нами, какъ проявленіе магнитной деформаціи, оріентированы извѣстнымъ образомъ около нѣкотораго опредѣленнаго направленія. Замѣчательно то, что во всѣхъ случаяхъ мы приходимъ къ одному и тому же направленію. Очевидно, что это направленіе является характернымъ и для самой магнитной деформаціи — причины различныхъ свойствъ магнитнаго поля. Отсюда мы заключаемъ, что *магнитная деформація создается по опредѣленному направленію*, что *она обладаетъ сторонностью*. И если мы будемъ какъ либо измѣрять эту деформацію, то величину ее изображающую надо разсматривать, какъ векторъ.

Вообразимъ себѣ теперь нѣкоторую поверхность, перпендикулярную направленію магнитной деформаціи. Мы можемъ говорить, что деформація произведена сквозь эту поверхность. Такимъ образомъ возникаетъ представленіе о магнитной деформаціи сквозь всю поверхность, о магнитной деформаціи сквозь элементъ поверхности. Для того, чтобы характеризовать деформацію въ количественномъ отношеніи, очевидно необходимо имѣть въ виду совершенно опредѣленную часть поверхности, перпендикулярной ей, ибо чѣмъ больше будетъ эта часть поверхности, тѣмъ будетъ больше полная деформація сквозь нее. Обыкновенно *величину магнитной деформаціи среды характеризуютъ деформаціей сквозь 1 кв. сантиметръ поверхности, перпендикулярной направленію ея, и называютъ это магнитной индукціей*. Обозначаютъ ее буквой B.

Опытъ показываетъ, что въ случаѣ среды однородной и изотропной то характерное направленіе, которое обнаруживается во всѣхъ проявленіяхъ магнитнаго поля, совпадаетъ съ направленіемъ магнитной силы H. Слѣдовательно, мы можемъ принять, что *въ средѣ однородной и изотропной направленіе магнитной индукціи B совпадаетъ съ направленіемъ магнитной силы H*.

7. Магнитная проницаемость. Обратимся теперь къ зависимости между магнитной индукціей и магнитной силой. Очевидно между этими двумя физическими величинами должна существовать связь такого же рода, какъ между причиной и слѣдствіемъ. Именно, основной величиной является магнитная индукція, характеризующая причину всѣхъ свойствъ магнитнаго поля. Съ

этой точки зрѣнія магнитная сила H есть результатъ существованія магнитной индукціи B. Мы можемъ, поэтому, a priori допустить, что чѣмъ больше B, тѣмъ больше и H. Но все же a priori мы не можемъ сказать, какова будетъ зависимость между этими двумя величинами: будетъ ли это простая пропорціональность или зависимость болѣе сложная. На этотъ вопросъ можно отвѣтить только на основаніи опытнаго изслѣдованія магнитнаго поля. Оказывается, напримѣръ, что величина магнитнаго вращенія плоскости поляризаціи свѣта съ большою степенью точности пропорціональна магнитной силѣ. Опытъ показываетъ, что интенсивность и всѣхъ другихъ проявленій магнитнаго поля, вообще говоря, пропорціональна магнитной силѣ. Слѣдовательно мы должны предположить, что всѣ разнообразныя проявленія магнитнаго поля пропорціональны одно другому; и тогда возникаетъ большое основаніе допустить, что и сама магнитная индукція B пропорціональна каждому изъ своихъ проявленій и въ частности магнитной силѣ. Эту зависимость выражаютъ такъ:

$$B = \mu H.$$

Здѣсь μ есть нѣкоторый коэффиціентъ пропорціональности. Слѣдуетъ имѣть въ виду, что μ не есть простой числовой коэффиціентъ, а есть нѣкоторая физическая величина, ибо B и H суть физическія величины разнаго рода: отъ умноженія H на μ мы получаемъ новую физическую величину B. Съ физическимъ значеніемъ величины μ мы познакомимся позже, а пока замѣтимъ, что она называется *магнитной проницаемостью*.

При одномъ и томъ же значеніи H или B величина магнитной проницаемости можетъ быть больше или меньше въ зависимости отъ свойствъ той среды, въ которой возникло магнитное поле. Вообще для данной среды μ можно разсматривать, какъ величину постоянную. Есть однако случаи, когда магнитная проницаемость вещества измѣняется. Объ этомъ будетъ рѣчь особо.

Зная численную величину магнитной проницаемости въ каждомъ частномъ случаѣ и умножая ее на магнитную силу, мы легко получаемъ и величину магнитной индукціи. Магнитную проницаемость вещества обыкновенно опредѣляютъ по сравненію съ магнитной проницаемостью пустоты (или, что почти то же,—воздуха). Въ этомъ случаѣ условно принимаютъ:

$$\mu = 1.$$

Слѣдовательно для пустоты (и воздуха) имѣемъ:

$$B = H.$$

Это соотношеніе надо понимать не въ томъ смыслѣ, что магнитная индукція въ воздухѣ есть то же, что и магнитная сила, а въ томъ смыслѣ, что *магнитная индукція въ воздухѣ численно равна магнитной силѣ.* По причинѣ численнаго равенства H и B часто, говоря о магнитномъ полѣ въ воздухѣ, пишутъ H вмѣсто B и наоборотъ. По существу эти понятія слѣдуетъ строго различать и въ томъ случаѣ, когда они численно равны.

8. Единица магнитной индукціи.—Если въ случаѣ пустоты мы имѣемъ:

$$H = 1,$$

то очевидно и

$$B = 1.$$

Такимъ образомъ мы имѣемъ единицу магнитной индукціи. Ее называютъ *гауссомъ.* Итакъ, *гауссъ есть магнитная индукція въ пустотѣ при силѣ поля равной единицѣ.*

Если, напримѣръ, для нѣкотораго случая:

$$\mu = 250$$

и

$$H = 40,$$

то имѣемъ:

$$B = 10\ 000 \text{ гауссовъ.}$$

9. Силовыя линіи магнитнаго поля.—Общая характеристика всего поля получается построеніемъ системы такъ называемыхъ *силовыхъ линій* магнитнаго поля.

Силовою линіею магнитнаго поля называется такая кривая, каждый элементъ которой совпадаетъ по направленію съ силою поля въ той точкѣ, гдѣ находится разсматриваемый элементъ.

Ясно конечно, что если бы мы могли осуществить изолированную магнитную массу, лишенную матеріальной инерціи, то такая масса двигалась бы въ магнитномъ полѣ, описывая силовую линію.

Силовымъ линіямъ приписываютъ то направленіе, которое имѣетъ сила поля въ каждой точкѣ линіи. Слѣдовательно силовыя линіи идутъ въ томъ направленіи, въ какомъ будетъ двигаться сѣверная магнитная масса. Такимъ образомъ, напримѣръ, *въ полѣ магнитовъ силовыя линіи направляются отъ сѣвернаго*

(положительнаго) полюса къ южному (отрицательному). Обыкновенно принято направленіе силовыхъ линій считать за *направленіе самого поля.*

Можно въ высшей степени просто получить картину силовыхъ линій въ магнитномъ полѣ. Дѣло въ томъ, что если мы помѣстимъ въ полѣ маленькую магнитную стрѣлку, свободно подвѣшенную, то она, какъ было указано въ § 4, расположится по направленію силы поля въ томъ мѣстѣ, гдѣ она находится, ибо сѣверный полюсъ ея будетъ стремиться двигаться вдоль направленія поля, а южный полюсъ — въ обратномъ направленіи. Если бы мы имѣли въ полѣ множество свободныхъ магнитныхъ стрѣлокъ, то онѣ всѣ, располагаясь въ направленіи силы поля, образовали бы цѣпи, форма которыхъ была бы

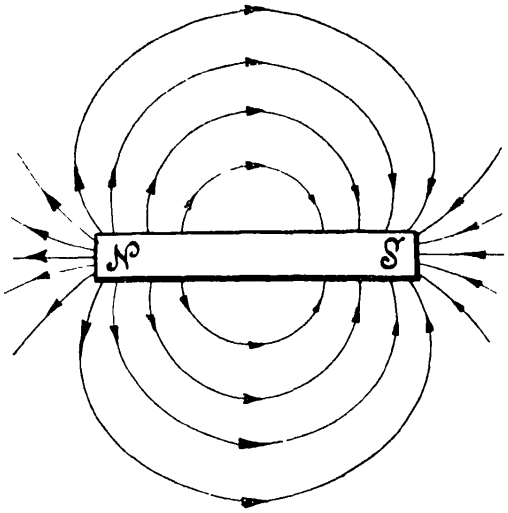


Рис. 6.

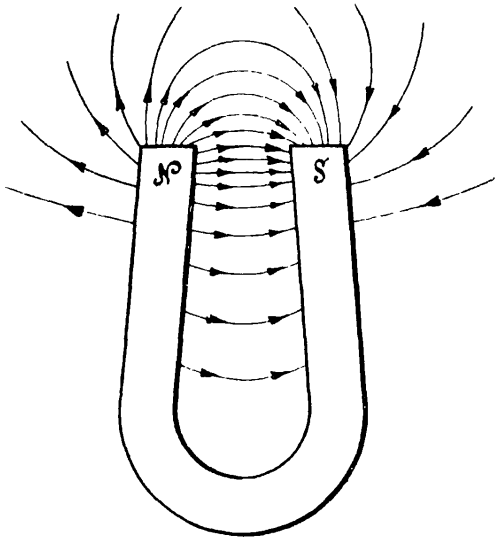


Рис. 7.

тѣмъ ближе къ формѣ силовыхъ линій, чѣмъ меньше были бы стрѣлки. Къ этимъ идеальнымъ условіямъ можно довольно близко подойти, вводя въ магнитное поле мелкіе опилки желѣза. Отдѣльные кусочки желѣза въ магнитномъ полѣ сами становятся магнитами и играютъ роль магнитныхъ стрѣлокъ. Получающаяся при этомъ картина носитъ названіе «*магнитнаго спектра*». Магнитный спектръ въ плоскости легко получить, если покрыть данный магнитъ листомъ картона и затѣмъ, посыпавъ поверхъ картона опилки (не слишкомъ густо и по возможности равномѣрно), слегка встряхивать его постукиваніемъ при помощи, напримѣръ, пальца для того, чтобы подбрасываемые при постукиваніи опилки могли свободно поворачиваться и принимать направленіе силы поля. Опилки тотчасъ же расположатся въ видѣ характерныхъ кривыхъ линій

На прилагаемыхъ рисункахъ показаны магнитные спектры въ нѣкоторыхъ главнѣйшихъ случаяхъ. Рис. 6 представляетъ силовыя линіи въ полѣ прямолинейнаго магнита. Рис. 7—силовыя линіи въ полѣ подковообразнаго магнита. Рис. 8—силовыя линіи между разноименными концами двухъ магнитовъ. Наконецъ, на рис. 9 представлены силовыя линіи между одноименными полюсами двухъ магнитовъ.

10. Линіи магнитной индукціи и магнитныя линіи.—Совершенно подобно тому, какъ мы строили въ предыдущемъ § систему линій, характеризующихъ поле съ точки зрѣнія распредѣленія въ немъ магнитной силы, мы можемъ построить и систему линій, характеризующихъ поле въ отношеніи магнитной деформаціи. Мы получаемъ такимъ образомъ систему линій магнитной индукціи.

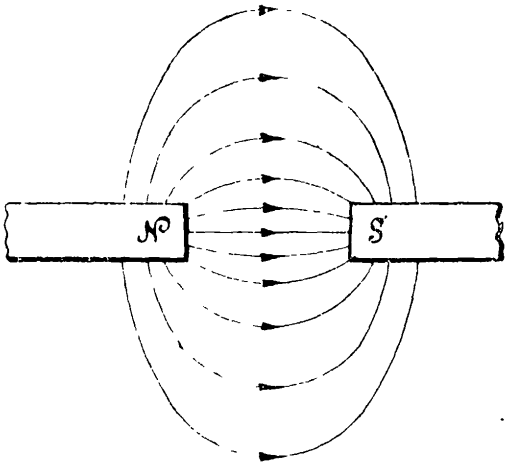


Рис. 8.

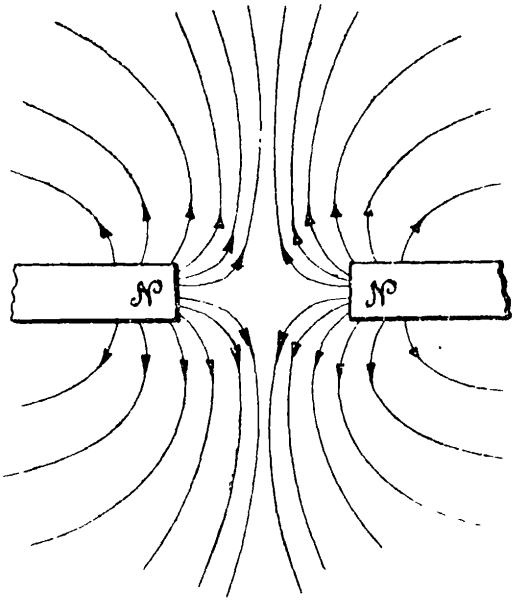


Рис. 9.

Линіей магнитной индукціи называется кривая, проведенная такъ, чтобы касательная къ ней въ любой ея точкѣ была параллельна магнитной индукціи въ той же точкѣ.

Такъ какъ въ средѣ однородной и изотропной направленіе магнитной индукціи совпадаетъ съ направленіемъ магнитной силы, то очевидно, что въ обычныхъ случаяхъ, напр. въ случаѣ магнитнаго поля въ пустотѣ или воздухѣ, каждая силовая линія есть въ то же время и линія магнитной индукціи, и вся система силовыхъ линій можетъ разсматриваться и какъ система линій магнитной индукціи. Слѣдовательно мы имѣемъ право смотрѣть на рисунки 6, 7, 8 и 9, какъ на схемы линій магнитной индукціи для ряда основныхъ случаевъ.

Пользуясь системой подобныхъ линій для характеристики поля въ отношеніи деформаціи среды, мы можемъ сдѣлать еще

одинъ шагъ дальше. Именно мы можемъ условиться строить эти линіи такъ, чтобы система ихъ давала намъ не только картину направленія, но и величину магнитной деформаціи. Для этого мы будемъ проводить ихъ въ такомъ количествѣ, чтобы на каждый квадратный сантиметръ поверхности, перпендикулярной магнитной индукціи, приходилось число линій, равное значенію магнитной индукціи для этого мѣста. Если въ данномъ мѣстѣ поля, напримѣръ, B равно 10 гауссамъ, то мы должны построить 10 линій сквозь 1 кв. см. и т. д. Это будутъ уже нѣкоторыя особыя линіи, которыя можно было бы назвать единичными линіями магнитной индукціи. Ради краткости мы будемъ называть ихъ *магнитными линіями*, строго различая ихъ отъ силовыхъ линій магнитнаго поля.

Магнитнымъ линіямъ, какъ и силовымъ линіямъ, приписывается опредѣленное направленіе, именно направленіе магнитной индукціи или, что вообще то же, направленіе магнитной силы, т. е. за положительное направленіе магнитныхъ линій въ полѣ магнита мы принимаемъ направленіе отъ сѣвернаго полюса къ южному. Итакъ, магнитныя линіи исходятъ изъ сѣвернаго полюса магнита и входятъ въ южный полюсъ.

Фарадэй, обратившій вниманіе на роль и значеніе промежуточной среды въ явленіяхъ магнитнаго поля, самъ не сразу подошелъ къ представленію о магнитныхъ линіяхъ, какъ о линіяхъ, имѣющихъ физическій смыслъ. Сначала онъ имѣлъ въ виду только чисто геометрическія силовыя линіи, но постепенно онъ сталъ придавать имъ физическое значеніе, сталъ смотрѣть на нихъ, какъ на линіи, характеризующія реально происходящій въ средѣ процессъ, и даже въ извѣстной степени, какъ на реально существующія линіи. Фарадэй сталъ придавать значеніе количеству этихъ линій и сталъ иногда называть ихъ «*физическими силовыми линіями*» (physical lines of force). То, что мы назвали просто «магнитной линіей», вполнѣ соотвѣтствуетъ фарадэевской «физической силовой линіи»; понятію «магнитная линія» мы будемъ стремиться придать то же содержаніе, какое Фарадэй связывалъ съ представленіемъ о «физической силовой линіи» магнитнаго поля.

Какъ мы уже говорили выше, съ фарадэевской точки зрѣнія всѣ проявленія магнитнаго поля представляютъ собою результатъ особаго состоянія среды. Пользуясь понятіемъ о магнитныхъ линіяхъ, какъ о физическихъ дѣятеляхъ, заполняю-

щихъ все магнитное поле и являющихся носителями особыхъ свойствъ среды, мы можемъ при разсмотрѣніи различныхъ проявленій магнитнаго поля видѣть причину ихъ въ спеціальныхъ качествахъ магнитныхъ линій. Такъ, согласно воззрѣніямъ Фарадэя, механическія дѣйствія магнитнаго поля объясняются тѣмъ, что магнитныя линіи ведутъ себя, какъ упругія нити: онѣ стремятся укоротиться и, кромѣ того, отталкиваются одна отъ другой, т. е. въ системѣ магнитныхъ линій наблюдается боковой распоръ. Съ этой точки зрѣнія притяженіе двухъ разноименныхъ полюсовъ объясняется, слѣдовательно, какъ результатъ стягиванія магнитныхъ линій, выходящихъ изъ одного полюса и входящихъ въ другой (см. рис. 8). Отталкиваніе же двухъ одноименныхъ полюсовъ (см. рис. 9) есть результатъ того, что магнитныя линіи, связанныя съ данными полюсами, двумя совершенно самостоятельными группами идутъ въ стороны, взаимно расталкиваясь.

Въ дальнѣйшемъ всегда, говоря о магнитномъ полѣ, мы будемъ представлять его заполненнымъ магнитными линіями. Замѣтимъ, что въ однородномъ магнитномъ полѣ (§ 4) густота магнитныхъ линій вездѣ одна и та же, и онѣ представляютъ собою параллельныя прямыя.

11. Магнитный потокъ.—Всякую совокупность магнитныхъ линій обыкновенно называютъ магнитнымъ потокомъ. Такъ мы можемъ говорить о магнитномъ потокѣ, исходящемъ изъ сѣвернаго полюса магнита и входящемъ въ южный. Можно представить себѣ магнитный потокъ, пронизывающій нѣкоторую поверхность или охватываемый нѣкоторымъ контуромъ. За направленіе магнитнаго потока принимается направленіе образующихъ его магнитныхъ линій, а число этихъ линій разсматривается, какъ мѣра магнитнаго потока. Обозначаютъ его обыкновенно буквою Φ.

Если въ нѣкоторомъ частномъ случаѣ во всѣхъ точкахъ данной поверхности магнитная индукція перпендикулярна поверхности, то величина магнитнаго потока сквозь такую поверхность опредѣляется весьма просто. Дѣйствительно, какъ это слѣдуетъ изъ опредѣленія магнитной линіи, магнитная индукція B въ каждой точкѣ поля есть не что иное, какъ число магнитныхъ линій, пронизывающихъ 1 кв. см. этой поверхности. Такимъ образомъ, если обозначимъ элементъ поверхности черезъ Δs, то потокъ сквозь этотъ элементъ можемъ выразить такъ:

$$\Delta\Phi = B \cdot \Delta s.$$

Просуммировавъ эти отдѣльные элементы магнитнаго потока по всей поверхности, получимъ:

$$\Phi = \Sigma\Delta\Phi = \Sigma B \cdot \Delta s.$$

Если для всѣхъ точекъ данной поверхности соблюдается условіе:

$$B = \text{Const.}$$

то выраженіе для потока Φ значительно упрощается:

$$\Phi = B \cdot \Sigma\Delta s = B \cdot s.$$

12. Единица магнитнаго потока.—Единицей магнитнаго потока будетъ очевидно потокъ въ одну магнитную линію. Эту единицу магнитнаго потока называютъ *максвеллемъ*. Такимъ образомъ, говорятъ о магнитномъ потокѣ въ 10, 1000, 10^6 максвеллей.

Связь между единицами магнитнаго потока и магнитной индукціи легко установить на основаніи соотношенія, приведеннаго въ концѣ предыдущаго §. Дѣйствительно, допустимъ, что

$$B = 1 \text{ гауссу}$$

и

$$s = 1 \text{ кв. см.}$$

Въ такомъ случаѣ:

$$\Phi = 1 \text{ максвеллю.}$$

Слѣдовательно *гауссъ есть максвелль на квадратный сантиметръ*.

13. Непрерывность магнитнаго потока.—Изучая поле магнита, мы до сихъ поръ обращали вниманіе только на пространство внѣ магнита. Нашему обслѣдованію мы подвергли, собственно говоря, только магнитный потокъ, исходящій изъ сѣвернаго магнитнаго полюса, проходящій черезъ внѣшнее пространство и входящій въ южный полюсъ. О томъ, что происходитъ внутри магнита, мы не говорили. На первый взглядъ можетъ показаться, что ничего особеннаго нельзя ожидать внутри самого магнита. Опустивъ магнитъ въ желѣзные опилки, мы увидимъ, что они пристаютъ только къ концамъ его, средняя же часть магнита какъ бы не обладаетъ никакими магнитными свойствами (рис. 10).

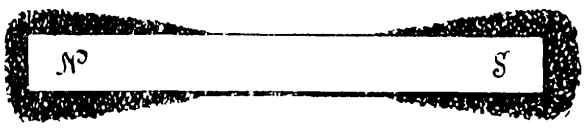


Рис. 10.

Объ этомъ же повидимому свидѣтельствуетъ и магнитный спектръ магнита (рис. 11): магнитный потокъ связанъ съ концами магнита, средняя

же часть послѣдняго кажется намъ неимѣющею никакого отношенія къ потоку. Все это, однако, такъ только кажется. Если мы возьмемъ и разломаемъ магнитъ на серединѣ, т. е. въ томъ именно мѣстѣ, гдѣ не обнаруживается обычно никакихъ магнитныхъ свойствъ, то окажется, что новые концы, образовавшіеся въ мѣстѣ излома, обладаютъ магнитными свойствами: они представляютъ собою разноименные полюсы, такъ что отдѣльныя половины первоначальнаго магнита образуютъ новые самостоятельные магниты NS_1 и N_1S (рис. 12) и, слѣдовательно, теперь картина магнитнаго потока дополняется магнитными линіями, идущими въ промежуткѣ N_1S_1 отъ N_1 къ S_1. Подобное ломаніе магнита можно продолжать дальше (рис. 13) и притомъ сколько угодно разъ, и послѣ всякаго новаго дѣленія будутъ получаться новые магниты и вноситься новыя дополненія въ картину магнитнаго потока. Вышеописанный опытъ показываетъ, что внутри магнита, тамъ, гдѣ повидимому вещество не находится въ какомъ-либо магнитномъ состояніи, на самомъ дѣлѣ магнитная деформація существуетъ, но только въ скрытомъ видѣ. Разламывая магнитъ, мы дѣлаемъ ее доступной нашему наблюденію. Во всемъ этомъ опытѣ особенно замѣчательно слѣдующее: направленіе магнитнаго потока въ

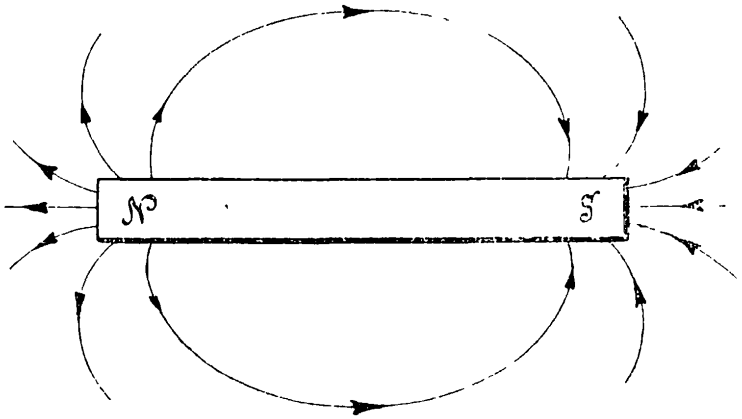


Рис. 11.

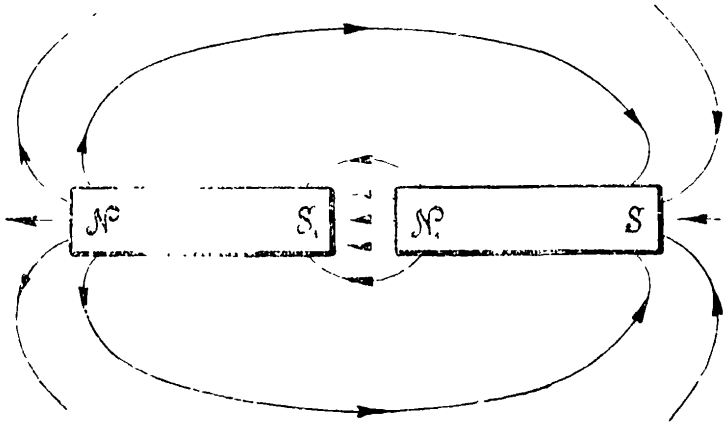


Рис. 12.

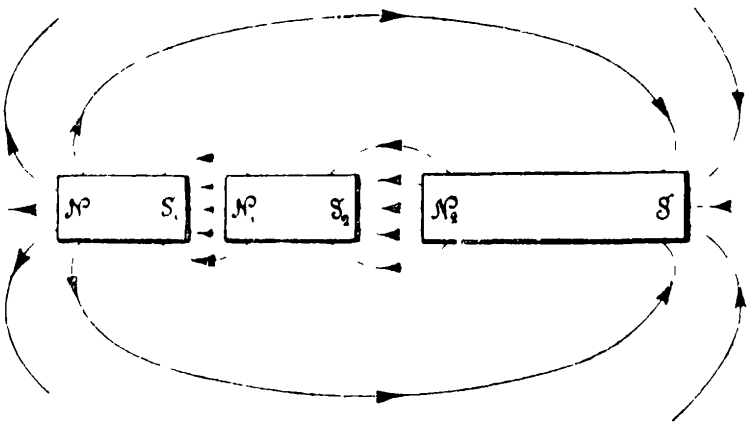


Рис. 13.

промежуткахъ N_1S_1, N_2S_2 и т. д. находится въ такомъ соотношеніи съ направленіемъ магнитнаго потока во внѣшнемъ полѣ, что естественно является идея, что потокъ не заканчивается на южномъ полюсѣ магнита, но проходитъ сквозь вещество магнита въ направленіи отъ южнаго полюса къ сѣверному и далѣе выходитъ изъ этого послѣдняго. Если же принять еще во вниманіе, что опытныя данныя неопровержимо свидѣтельствуютъ о томъ, что число магнитныхъ линій, исходящихъ изъ полюса N и входящихъ въ полюсъ S, въ точности равно числу магнитныхъ линій, проходящихъ черезъ промежутки N_1S_1, N_2S_2 и т. д., то мы необходимо приходимъ къ такому выводу:

Магнитный потокъ, связанный съ магнитомъ, непрерывенъ, т. е. каждая образующая его магнитная линія пробѣгаетъ массу магнита и выходитъ наружу черезъ сѣверный полюсъ, чтобы опять вступить въ магнитъ черезъ южный полюсъ.

Представленіе о непрерывности магнитнаго потока явилось результатомъ многочисленныхъ изслѣдованій Фарадэя, который хорошо резюмировалъ этотъ важный принципъ въ слѣдущемъ отрывкѣ (Experimental Researches, § 3117): «Внутри магнита существуютъ силовыя линіи той же природы, какъ и внѣ его. Даже болѣе, количество внутреннихъ линій строго равняется количеству внѣшнихъ. Направленіе внутреннихъ линій связано съ направленіемъ внѣшнихъ и, собственно говоря, внутреннія линіи, составляя продолженіе внѣшнихъ, имѣютъ совершенно ту же природу, насколько это можно изслѣдовать опытомъ. Поэтому каждая силовая линія, на какомъ бы разстояніи отъ магнита мы ее ни взяли, должна быть разсматриваема, какъ замкнутая цѣпь, проходящая нѣкоторой своей частью черезъ магнитъ и имѣющая одинаковое количество силы въ каждомъ мѣстѣ на своемъ протяженіи». Напомнимъ, что фарадэевская «силовая линія» соотвѣтствуетъ нашей магнитной линіи.

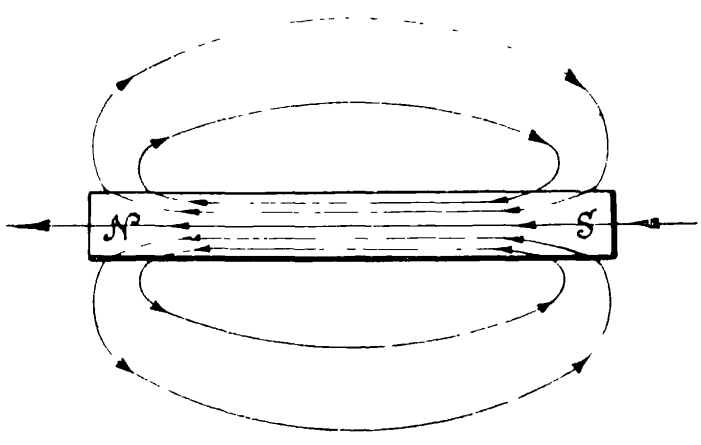


Рис. 14.

Итакъ, магнитный потокъ, органически связанный съ магнитомъ, мы должны представлять себѣ такъ, какъ это изображено на рис. 14. То, что мы назвали магнитной массой, намъ кажется распо-

ложеннымъ на тѣхъ частяхъ поверхности магнита, сквозь которыя выходитъ или входитъ магнитный потокъ, т. е. на концахъ магнита. Другими словами, эти концы магнита представляются намъ средоточіемъ способности притягивать, и это потому, что они являются въ нѣкоторомъ родѣ центрами, изъ которыхъ расходятся во внѣшнее пространство магнитныя линіи, стремящіяся сократиться и сокращающіяся, когда это оказывается возможнымъ.

14. Тѣла парамагнитныя и діамагнитныя.—Если мы измѣримъ число магнитныхъ линій, проходящихъ внутри желѣза, внесеннаго въ магнитное поле, то увидимъ, что на 1 квадратный сантиметръ поверхности, перпендикулярной магнитнымъ линіямъ, внутри желѣза будетъ ихъ приходиться больше, чѣмъ если бы вмѣсто желѣза была пустота или воздухъ. Отсюда мы заключаемъ, что существуютъ вещества, для которыхъ:

$$B > H$$

и слѣдовательно:

$$\mu > 1.$$

Такія тѣла называются собственно магнитными или, по Фарадэю, *парамагнитными*. Къ числу парамагнитныхъ тѣлъ, кромѣ желѣза, принадлежатъ еще никкель, кобальтъ, марганецъ, хромъ и многія другія. Замѣтимъ, что только для немногихъ тѣлъ магнитная проницаемость значительно больше единицы. Къ числу таковыхъ, выдѣляемыхъ въ особую группу такъ называемыхъ тѣлъ сильно магнитныхъ или *ферромагнитныхъ*, относятся желѣзо, никкель, кобальтъ и нѣкоторые сплавы. Для огромнаго же большинства парамагнитныхъ тѣлъ значеніе магнитной проницаемости лишь очень немного больше единицы.

Итакъ, если внести въ магнитное поле кусокъ, напримѣръ, желѣза, то распредѣленіе магнитныхъ линій въ полѣ измѣнится, и въ общемъ должна получиться картина, подобная представленной на рис. 15. Магнитныя линіи будутъ проходить сквозь желѣзо примѣрно такъ же, какъ если бы это былъ стальной магнитъ. И дѣйствительно кусокъ желѣза въ этомъ случаѣ обладаетъ всѣми свойствами магнита, онъ, какъ говорятъ, намагничивается черезъ вліяніе. Мы называемъ сѣвернымъ полюсомъ намагниченной желѣзной полосы Q тотъ конецъ, черезъ который магнитныя линіи выходятъ наружу, а южнымъ — конецъ, черезъ который магнитныя линіи входятъ внутрь. По Фарадэю

намагниченіе желѣза и вообще парамагнитныхъ тѣлъ въ магнитномъ полѣ заключается именно въ разсматриваемомъ сгущеніи магнитныхъ линій. Магнитныя линіи легче, охотнѣе проходятъ черезъ парамагнитныя тѣла, оказывающіяся болѣе проницаемыми для нихъ, чѣмъ пустота. Отсюда и понятіе о «магнитной проницаемости».

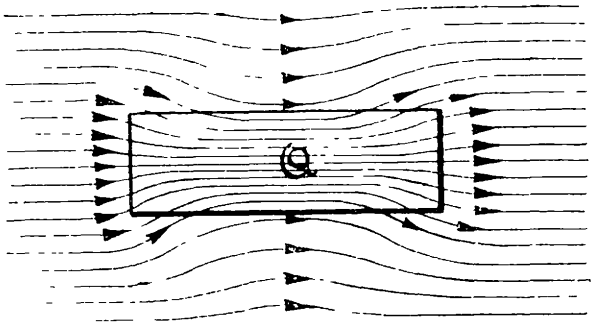


Рис. 15.

Въ случаѣ магнитнаго поля все происходитъ совершенно аналогично тому, какъ если бы мы, имѣя потокъ воды въ равномѣрно пропускающей средѣ, замѣнили часть ея Q (рис. 15) веществомъ, болѣе проницаемымъ для воды. Въ такомъ случаѣ вода, протекавшая прежде по всей средѣ, будетъ проходить главнымъ образомъ по пути наименьшаго сопротивленія, т. е. черезъ Q. И схема распредѣленія водяныхъ струй получится совершенно анологичная картинѣ магнитнаго потока. Подобная аналогія отнюдь не даетъ права предполагать, что въ магнитномъ полѣ мы имѣемъ какое либо движеніе именно вдоль магнитныхъ линій. Однако надо думать, что самый терминъ «магнитный потокъ» возникъ не безъ вліянія этой аналогіи.

Остановимся еще на одной комбинаціи, представляющей практическій интересъ. Вообразимъ себѣ, что въ магнитное поле между полюсами N и S (рис. 16) внесено желѣзное кольцо. Въ такомъ случаѣ магнитныя линіи опять таки соберутся главнымъ образомъ въ желѣзѣ, какъ это показано на рисункѣ; внутри же кольца магнитное поле будетъ очень ослаблено. Слѣдовательно въ этихъ условіяхъ желѣзное кольцо играетъ роль магнитнаго экрана.

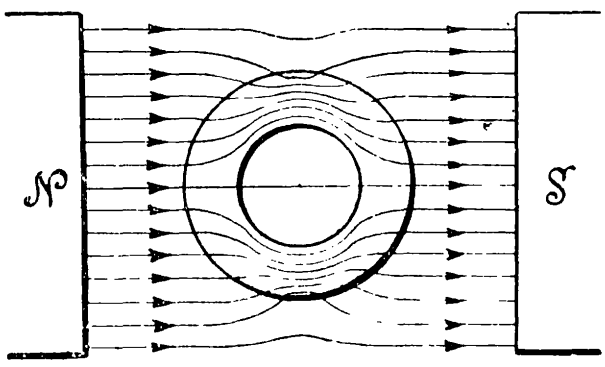


Рис. 16.

Кромѣ тѣлъ парамагнитныхъ существуютъ еще такія тѣла, въ которыхъ магнитная индукція меньше, чѣмъ если бы объемъ, ими занимаемый, былъ совершенно лишенъ вещества. Другими словами, для такихъ тѣлъ имѣемъ:

$$B < H$$

и слѣдовательно:

$$\mu < 1.$$

Такія тѣла Фарадэй назвалъ *діамагнитными*. Наиболѣе характернымъ въ этомъ отношеніи является висмутъ, для котораго имѣемъ:

$$\mu = 0{,}99983.$$

Мы видимъ отсюда, что, вообще говоря, у всѣхъ діамагнитныхъ тѣлъ магнитная проницаемость весьма мало отличается отъ единицы.

15. Магнитныя свойства желѣза. Гистерезисъ.—Изъ всѣхъ ферромагнитныхъ тѣлъ наиболѣе типичнымъ является желѣзо, на магнитныхъ свойствахъ котораго мы вкратцѣ остановимся.

Магнитная проницаемость желѣза, вообще говоря, не есть величина постоянная; она измѣняется въ зависимости отъ цѣлаго ряда обстоятельствъ; отъ величины магнитной индукціи или силы поля, отъ предварительнаго состоянія, отъ температуры и т. д.

Въ зависимости отъ магнитной силы H и индукціи B магнитная проницаемость μ измѣняется въ очень широкихъ предѣлахъ, какъ видно изъ нижеслѣдующей таблицы, въ которой приведены, въ видѣ примѣра, для одного сорта желѣза H и B, полученныя опытнымъ путемъ и вычисленныя на основаніи ихъ значенія магнитной проницаемости.

H	B	$\mu = \frac{B}{H}$
0,9	1 130	1 260
1,55	5 200	3 350
2,7	8 160	3 020
3,75	9 180	2 530
8,55	12 110	1 160
18,1	11 510	800
11,5	15 710	160
82,7	17 150	210
145,3	18 200	130

Надо замѣтить, что цифры, данныя въ вышеприведенной таблицѣ, представляютъ собою нѣкоторыя среднія значенія μ. Въ дѣйствительности для одного и того же значенія магнитной силы магнитная проницаемость желѣза можетъ имѣть безчисленное множество значеній. Другими словами, одному и тому же значенію магнитной силы H можетъ соотвѣтствовать безчисленное множество значеній магнитной индукціи B въ желѣзѣ. Оказывается, что при одномъ и томъ же H и прочихъ равныхъ условіяхъ магнитное состояніе желѣза въ сильной степени зависитъ отъ предыдущаго состоянія, такъ сказать отъ магнитной исторіи даннаго образца желѣза. И эта зависимость выражается въ томъ, что при измѣненіи силы поля магнитная индукція какъ бы запаздываетъ. Именно, для одного и того же значенія силы поля H значеніе магнитной индукціи B будетъ меньше въ томъ случаѣ, когда мы идемъ въ сторону усиленія поля, и больше, когда мы идемъ въ обратномъ направленіи. Юингъ далъ этому свойству магнитныхъ веществъ названіе *гистерезиса* (корень этого слова обозначаетъ по-гречески «запаздываніе»). Явленіе гистерезиса свидѣтельствуетъ о томъ, что намагниченіе или перемагниченіе желѣза, вообще измѣненіе его магнитнаго состоянія, встрѣчаетъ какое-то сопротивленіе внутри желѣза. Все происходитъ такъ, какъ будто бы при процессѣ измѣненія магнитнаго состоянія вещества приходится преодолѣвать внутреннія тренія. Въ подтвержденіе этого предположенія можно привести тотъ фактъ, что при перемагничиваніи желѣза всегда расходуется нѣкоторое количество энергіи, которое въ конечномъ итогѣ переходитъ въ тепло и повышаетъ температуру желѣза. Такимъ образомъ при перемагничиваніи желѣза обнаруживается *потеря энергіи на гистерезисъ* подобно тому, какъ при всякомъ другомъ процессѣ въ матеріальной средѣ часть энергіи идетъ на преодолѣніе треній и повышеніе температуры трущихся частей системы.

16. Земное магнитное поле.—Тотъ фактъ, что свободно подвѣшенный магнитъ, такъ называемая магнитная стрѣлка, всегда устанавливается въ нѣкоторомъ опредѣленномъ направленіи, именно приблизительно съ юга на сѣверъ, свидѣтельствуетъ намъ о существованіи магнитнаго поля, органически связаннаго съ земнымъ шаромъ. Другими словами, все происходитъ такъ, какъ будто бы земля представляетъ собою магнитъ. Въ первомъ приближеніи и въ общихъ чертахъ земное магнитное поле ока-

зывается такимъ, какое произошло бы отъ небольшого магнита, помѣщеннаго въ центрѣ земли и имѣющаго ось подъ угломъ около 16° къ оси вращенія земли. Тѣ точки, въ которыхъ ось этого магнита пересѣкаетъ земную поверхность, называются *земными магнитными полюсами*. Такимъ образомъ, земные магнитные полюсы не совпадаютъ съ географическими полюсами. При помощи совершенной и потребовавшей большого труда обработки магнитныхъ наблюденій Гауссъ далъ положеніе полюса въ сѣверномъ полушаріи въ 1838 году 73°35′ сѣв. широты и 264°21′ восточной долготы и въ южномъ полушаріи 72°35′ южной широты и 152°30′ восточной долготы. Ясно конечно, что, держась установленной терминологіи и основываясь на законѣ взаимодѣйствія полюсовъ, мы должны приписывать южную полярность магнитному полюсу сѣвернаго полушарія и сѣверную полярность магнитному полюсу южнаго полушарія.

Магнитное поле земли въ данномъ мѣстѣ можно считать однороднымъ.

Для опредѣленія величины и направленія магнитной силы земного поля въ нѣкоторой точкѣ обыкновенно измѣряютъ три слѣдующихъ величины:

1) *Горизонтальную составляющую* земной магнитной силы.

2) Уголъ, образуемый направленіемъ горизонтальной составляющей съ географическимъ меридіаномъ. Этотъ уголъ называютъ *склоненіемъ*, а вертикальную плоскость, проходящую черезъ направленіе горизонтальной составляющей,—*магнитнымъ меридіаномъ*.

3) *Наклоненіе*, т. е. уголъ, образуемый магнитною силою земного поля съ горизонтальною плоскостью.

Очевидно, что, зная горизонтальную составляющую H' и уголъ наклоненія α, нетрудно вычислить полную магнитную силу H, именно:

$$H = \frac{H'}{\cos \alpha}.$$

Для примѣра приведемъ характеристики земного магнитнаго поля для главнѣйшихъ центровъ Европы, относящіяся къ 1892 году.

	Склоненіе.	Наклоненіе.	Горизонт. сост.
Стокгольмъ	8°1′W	70°45′	0,16251
С.-Петербургъ	0°0′	70 43′	0,16445
Москва	2°38′O	68 41′	0,18050
Лондонъ	17°27′W	67°30′	0,18198
Берлинъ	10°23′—	66°49′	0,18592
Парижъ	15°24′—	65 8′	0,19596
Римъ	10°37′—	58°7′	0,23295

Должно замѣтить, что въ каждомъ данномъ мѣстѣ характеристики земного магнитнаго поля не остаются постоянными, но претерпѣваютъ съ теченіемъ времени измѣненія (варіаціи).

ГЛАВА ВТОРАЯ.

Электрическій токъ. Основныя явленія.

17. Электромагнитная индукція тока.—До сихъ поръ мы, изучая магнитное поле, мысленно связывали его съ какимъ либо магнитомъ или группою магнитовъ. Существуютъ однако еще и другія условія, на первый взглядъ, совсѣмъ иного рода, при которыхъ также обнаруживается магнитное поле. Подобныя условія могутъ быть созданы, напримѣръ, такимъ образомъ. Представимъ себѣ металлическую проволоку, концы которой спаяны между собой, благодаря чему образуется замкнутый металлическій контуръ PQ (рис. 17). Часть его Q закрѣпимъ не-

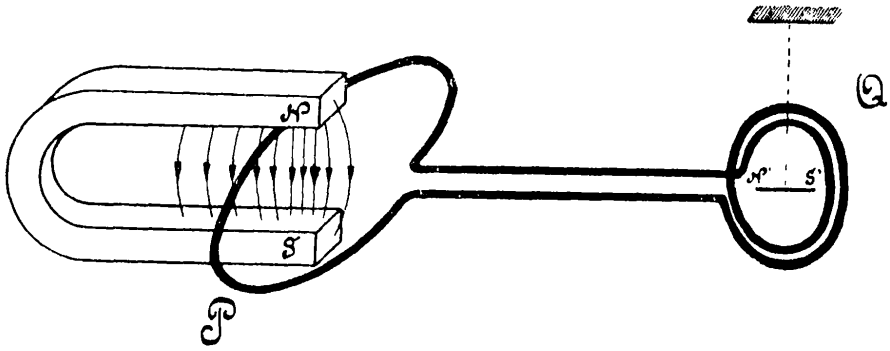


Рис. 17.

подвижно и внутри образуемыхъ имъ нѣсколькихъ витковъ подвѣсимъ магнитную стрѣлку $N'S'$. Слѣдуетъ оговориться, что примѣненіе нѣсколькихъ витковъ вмѣсто одного по существу неважно и дѣлается обычно только для усиленія наблюдаемыхъ явленій. Съ тою же цѣлью самые витки обыкновенно располагаются въ плоскости магнитнаго меридіана такъ, чтобы магнит-

ная стрѣлка $N'S'$ нормально висѣла въ плоскости образуемыхъ контуромъ витковъ. Станемъ теперь двигать другую часть контура P въ магнитномъ полѣ, созданномъ неподвижнымъ магнитомъ NS, расположеннымъ сколь угодно далеко отъ того мѣста, гдѣ находятся витки Q и стрѣлка $N'S'$. Если часть контура P будетъ двигаться такимъ образомъ, чтобы при этомъ *перерѣзывались магнитныя линіи* поля, то во все время подобнаго движенія вблизи всѣхъ безъ исключенія частей нашего металлическаго контура можно обнаружить магнитное поле, исчезающее вмѣстѣ съ прекращеніемъ процесса перерѣзыванія магнитныхъ линій частью контура. Это вновь возникающее магнитное поле проще всего обнаружить по его дѣйствію на магнитную стрѣлку, расположенную близъ контура, и особенно рѣзко это проявится на стрѣлкѣ $N'S'$, расположенной въ условіяхъ особенно благопріятныхъ. Именно мы увидимъ, что въ моменты перерѣзанія контуромъ магнитныхъ линій стрѣлка $N'S'$ будетъ выходить изъ плоскости витковъ, стремясь стать перпендикулярно проволокѣ, образующей витки. Слѣдовательно, *въ описываемыхъ условіяхъ возникаетъ магнитная сила, перпендикулярная проволокѣ.* И это справедливо по отношенію ко всѣмъ частямъ нашего замкнутаго контура. Замѣчательно то, что описываемыя явленія имѣютъ мѣсто совершенно независимо отъ того, каковы размѣры контура, каково разстояніе между, напримѣръ, частями P и Q. Оно можетъ быть равно десяткамъ метровъ, десяткамъ, сотнямъ, тысячамъ километровъ. Это обстоятельство свидѣтельствуетъ намъ о томъ, что въ разсматриваемыхъ условіяхъ *въ мѣстѣ перерѣзыванія магнитныхъ линій частью замкнутаго металлическаго контура происходитъ какое то явленіе, сопровождающееся распространеніемъ вдоль всей проволоки особыхъ свойствъ*, обнаруживаемыхъ въ нашемъ опытѣ при помощи магнитной стрѣлки $N'S'$. При этомъ сама проволока играетъ роль направляющихъ въ возникающемъ новомъ процессѣ. Вся совокупность опытныхъ данныхъ говоритъ за то, что этотъ процессъ имѣетъ чисто кинетическій характеръ. Мы его называемъ *электрическимъ токомъ*. Итакъ, въ то время какъ замкнутый металлическій контуръ какой либо своей частью перерѣзываетъ магнитныя линіи, въ этомъ контурѣ возникаетъ электрическій токъ. Предполагаютъ при этомъ, что въ связи съ появленіемъ магнитнаго поля вокругъ проволоки вдоль нея течетъ нѣкоторый дѣятель, называемый *электричествомъ*. Такимъ

образомъ является представленіе о теченіи электричества по проволокѣ; говорятъ: по проволокѣ течетъ электрическій токъ. Возбужденіе электрическаго тока при перерѣзываніи контуромъ магнитныхъ линій было открыто Фарадэемъ. Это явленіе называется *электромагнитной индукціей тока.* Возникшій въ подобныхъ условіяхъ электрическій токъ иногда называютъ *индуктированнымъ токомъ.*

Прежде чѣмъ перейти къ изученію свойствъ электрическаго тока, полезно обратить вниманіе на то обстоятельство, что схема, представленная на рис. 17, есть, въ сущности говоря, теоретическая схема всякаго современнаго устройства для электрической передачи энергіи. Часть контура P въ связи съ магнитомъ NS играетъ роль генератора электрическаго тока; это—генераторная станція. Часть контура Q съ магнитной стрѣлкой $N'S'$ играетъ роль пріемника; это—электродвигатель, т. е. такой приборъ, въ которомъ при помощи электрическаго тока создается движеніе. Въ данномъ случаѣ при помощи возникающаго въ контурѣ электрическаго тока приводится въ движеніе магнитная стрѣлка $N'S'$. И, исходя изъ закона сохраненія энергіи, мы можемъ утверждать, что механическая работа, которая совершается при передвиженіи въ части нашей схемы, играющей роль электродвигателя, должна черпаться изъ того источника энергіи, который приводитъ въ движеніе часть контура P, нашъ генераторъ тока. Въ дѣйствительности такъ именно это и происходитъ. На электрической станціи генераторы электрическаго тока берутъ энергію отъ приводящихъ ихъ въ движеніе тепловыхъ или гидравлическихъ двигателей и превращаютъ ее въ *энергію электрическаго тока.* Въ электрическихъ же двигателяхъ электрическая энергія претерпѣваетъ обратное превращеніе въ механическую работу. Проволоки, соединяющія генераторъ съ пріемникомъ, въ нашемъ случаѣ P съ Q, представляютъ собою *линію передачи.*

Въ опытѣ, который представленъ схематически на рис. 17, обнаруживаются при внимательномъ изслѣдованіи всѣ основныя свойства того процесса, который мы назвали электрическимъ токомъ. Къ болѣе или менѣе детальному изученію этихъ свойствъ мы и переходимъ.

18. Проводники и непроводники (изоляторы). — Опытъ показываетъ, что въ явленіи электрическаго тока играетъ существенную роль вещество, изъ котораго составленъ разсмотрѣн-

ный выше замкнутый контуръ, называемый иногда *цѣпью электрическаго тока* или просто *электрической цѣпью*. Въ первомъ приближеніи всѣ тѣла можно раздѣлить на два класса.

Тѣла перваго класса обладаютъ тѣмъ свойствомъ, что во всякой замкнутой цѣпи, составленной изъ этихъ тѣлъ, можетъ возникнуть электрическій токъ. Эти тѣла проводятъ электрическій токъ. Они называются поэтому *проводниками*. Къ числу проводниковъ относятся металлы, уголь, графитъ, водные растворы солей и кислотъ и нѣкоторыя другія тѣла.

Тѣла второго класса, такъ называемые *непроводники* или *изоляторы*, обладаютъ слѣдующимъ свойствомъ: если они входятъ въ составъ нашей замкнутой цѣпи хотя бы на протяженіи незначительнаго участка, то въ такой цѣпи обычно не возникаетъ электрическій токъ. Эти тѣла, слѣдовательно, не проводятъ электрическаго тока. Къ числу непроводниковъ относятся стекло, сѣра, смолы, слюда, фарфоръ, парафинъ, шелкъ и много другихъ тѣлъ, изъ которыхъ упомянемъ еще только воздухъ при обычныхъ условіяхъ.

Проволоки, изъ которыхъ составляютъ электрическія цѣпи, часто покрываютъ такъ называемой *изоляціей*, состоящей изъ слоя непроводящаго токъ вещества. Это дѣлается съ тою цѣлью, чтобы путь тока былъ строго опредѣленный и чтобы не произошло случайныхъ усложненій или измѣненій контура тока въ случаѣ соприкосновенія отдѣльныхъ частей контура съ посторонними проводниками или между собою, какъ это, напримѣръ, можетъ легко произойти при образованіи витковъ проволоки. Проволока, служащая для составленія электрической цѣпи, иногда просто называется *проводникомъ* или *проводомъ*.

Производя опытъ, описанный въ предыдущемъ §, съ контурами тождественными въ геометрическомъ смыслѣ, но составленными изъ проволокъ изъ различныхъ матеріаловъ, напримѣръ, изъ мѣди, платины, свинца и т. д., нетрудно замѣтить, что при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ отклоненіе магнитной стрѣлки электрическимъ токомъ будетъ различно въ различныхъ случаяхъ. Оно будетъ больше, когда проводъ сдѣланъ изъ мѣди, и меньше въ случаѣ платины и т. д. Отсюда мы заключаемъ, что интенсивность наблюдаемаго процесса, т. е. электрическаго тока, будетъ зависѣть отъ вещества проводника. А слѣдовательно вещество проводника, его масса принимаетъ участіе въ явленіи электрическаго тока. Другими словами, при прохожденіи электри-

ческаго тока вдоль проводника, внутри самого проводника происходитъ нѣчто. Это заключеніе вполнѣ согласуется съ представленіемъ о теченіи электричества сквозь поперечныя сѣченія проводника, какъ объ одной изъ частей того несомнѣнно сложнаго процесса, который мы называемъ электрическимъ токомъ. Необходимо только строго помнить, что ни магнитное поле, возникающее вокругъ проводника съ электрическимъ токомъ, ни самый процессъ теченія электричества вдоль проводника не слѣдуетъ разсматривать порознь, какъ какія-либо самостоятельныя обособленныя явленія или какъ явленія, изъ которыхъ одно оказывается слѣдствіемъ другого. Надо имѣть въ виду, что все это лишь отдѣльныя части одного сложнаго процесса, электрическаго тока, который происходитъ какъ внутри, такъ и внѣ проводника. Нельзя себѣ представить электрическій токъ безъ движенія электричества. Совершенно также не можетъ быть рѣчи объ электрическомъ токѣ, не сопутствуемомъ магнитнымъ полемъ. Въ силу чисто историческихъ причинъ мы, говоря объ электрическомъ токѣ, обыкновенно сосредоточиваемъ наше вниманіе главнымъ образомъ на проводникѣ. Чтобы не впасть въ ошибку, мы всегда, говоря объ электрическомъ токѣ, должны мысленно охватывать всю совокупность явленій какъ внутри, такъ и внѣ объема проводника, приписывая этому послѣднему роль направляющей, вокругъ которой извѣстнымъ образомъ оріентируется и съ которою такимъ образомъ оказывается связаннымъ разсматриваемый процессъ.

19. Характеристики электрической цѣпи: сила тока, электродвижущая сила и электрическое сопротивленіе.—При количественномъ изслѣдованіи свойствъ электрическаго тока и законовъ, которымъ онъ подчиняется, необходимо прежде всего установить, какими величинами мы будемъ характеризовать его. Въ этомъ отношеніи мы можемъ притти къ желаемымъ результатамъ, обратившись къ основному явленію: электромагнитной индукціи тока.

Опытъ, описанный въ § 17, показываетъ, что механическія силы, съ которыми токъ дѣйствуетъ на магнитную стрѣлку и, слѣдовательно, уголъ отклоненія послѣдней отъ нормальнаго положенія могутъ быть различны въ зависимости отъ разныхъ обстоятельствъ, напримѣръ отъ скорости перерѣзыванія магнитныхъ линій. Другими словами, сила магнитнаго поля тока въ данной точкѣ не есть величина неизмѣнная. Она очевидно за-

виситъ отъ характера электрическаго тока. Самое естественное предположеніе, какое только можно сдѣлать, это то, что въ каждой точкѣ сила магнитнаго поля тока зависитъ отъ интенсивности разсматриваемаго сложнаго процесса или, какъ принято говорить, отъ *силы тока*. Мы должны допустить, что усиленіе магнитнаго поля тока свидѣтельствуетъ намъ объ усиленіи самаго тока и, обратно, болѣе слабому магнитному полю тока соотвѣтствуетъ меньшая сила тока. Такъ какъ магнитное поле тока не есть какой-либо отдаленный результатъ дѣйствія электрическаго тока, но представляетъ собою органическую часть изучаемаго процесса, то, очевидно, силу этого магнитнаго поля въ нѣкоторой точкѣ мы должны считать прямо-пропорціональной силѣ тока. Такимъ образомъ, судить о силѣ тока мы можемъ непосредственно по силѣ его магнитнаго поля, что практически сводится къ наблюденію механическихъ силъ, съ которыми токъ дѣйствуетъ на магнитную стрѣлку, т. е. къ наблюденію силы взаимодѣйствія тока и магнита. Исходя изъ этихъ взаимодѣйствій, можно установить единицу силы тока, какъ это мы увидимъ впослѣдствіи. Величину силы тока обыкновенно обозначаютъ буквою i.

Говоря о силѣ тока, мы имѣемъ въ виду качество, которое можно и должно приписать любому участку электрической цѣпи. По всей цѣпи протекаетъ токъ, во всякомъ мѣстѣ цѣпи токъ имѣетъ нѣкоторую совершенно опредѣленную силу. Есть однако еще такое качество цѣпи, которое обыкновенно бываетъ присуще только какой-либо одной части цѣпи. Именно, если мы обратимся къ вопросу о причинѣ, возбуждающей токъ, то очевидно мы должны ее отнести къ тому мѣсту, гдѣ происходитъ пересѣченіе магнитныхъ линій проводникомъ, ибо этотъ процессъ и оказывается источникомъ всѣхъ возникающихъ при этомъ явленій. Они возбуждаются, какъ только проводникъ начинаетъ пересѣкать магнитныя линіи, и исчезаютъ, какъ только прекратится относительное перемѣщеніе проводника и магнитнаго потока. Ясно конечно, что это перемѣщеніе магнитныхъ линій мы должны разсматривать, какъ обстоятельство, обусловливающее появленіе въ данномъ мѣстѣ цѣпи особаго состоянія электрическаго характера, которое мы считаемъ непосредственною причиною электрическаго тока, причиною движенія электричества. Эту причину называютъ *электродвижущей силой*. Мы будемъ сокращенно писать *э. д. с.* и обозначать величину ея буквою e.

Въ предыдущемъ § мы указывали уже, что вещество проводника оказываетъ вліяніе на интенсивность явленій, которыми характеризуется электрическій токъ, т. е. на силу тока. Опытъ показываетъ, что въ этомъ отношеніи вліяютъ еще и геометрическіе размѣры проводника, его температура, вообще всѣ обстоятельства, какъ либо дѣйствующія на состояніе проводника. Такимъ образомъ, въ зависимости отъ свойства проводника электрическій токъ при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ можетъ быть сильнѣе или слабѣе; другими словами, всякій проводникъ обладаетъ нѣкоторымъ качествомъ, которое позволяетъ процессу электрическаго тока развиться въ большей или меньшей степени. Обыкновенно принято разсматривать это характерное качество, какъ *электрическое сопротивленіе* проводника. Терминъ «сопротивленіе» въ данномъ случаѣ особенно умѣстенъ, такъ какъ проводникъ играетъ роль направляющей въ процессѣ электрическаго тока. А мы знаемъ, что въ любомъ процессѣ кинетическаго характера направляющая всегда оказываетъ большее или меньшее сопротивленіе совершающемуся вдоль нея движенію. Величину электрическаго сопротивленія будемъ обозначать буквою r.

Итакъ, всякій проводникъ, всякая электрическая цѣпь обладаетъ электрическимъ сопротивленіемъ. Это есть характеристика цѣпи, имѣющая мѣсто и значеніе совершенно независимо отъ того, идетъ ли по цѣпи токъ или нѣтъ. Если въ какомъ-либо мѣстѣ въ данной замкнутой цѣпи возникнетъ по той или иной причинѣ электродвижущая сила, то по цѣпи начнетъ протекать электрическій токъ, сила котораго обусловливается величиной электрическаго сопротивленія.

20. Законъ Ома.— Интенсивность всякаго движенія будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше силы, производящія это движеніе и поддерживающія его, и чѣмъ меньше сопротивленіе, оказываемое этому движенію средою или тѣми направляющими, вдоль которыхъ совершается данный кинетическій процессъ. Въ примѣненіи къ электрическому процессу—электрическому току въ нѣкоторой замкнутой цѣпи—мы можемъ сказать, что сила тока тѣмъ больше, чѣмъ больше электродвижущая сила и чѣмъ меньше электрическое сопротивленіе цѣпи. Простѣйшимъ образомъ зависимость такого рода выражается, если мы допустимъ, что *сила тока прямо-пропорціональна электродвижущей силѣ и*

обратно-пропорціональна сопротивленію цѣпи. При помощи принятыхъ нами обозначеній это соотношеніе изобразится такъ:

$$i = \frac{e}{r}.$$

Подобная связь между основными характеристиками электрической цѣпи была указана Омомъ, который въ своихъ изслѣдованіяхъ исходилъ изъ аналогіи, существующей между электрическимъ токомъ и распространеніемъ теплоты. По имени этого ученаго указанное соотношеніе называется *закономъ Ома.*

Для провѣрки справедливости этого закона было сдѣлано очень много весьма тщательныхъ провѣрочныхъ опытовъ надъ токами въ твердыхъ и жидкихъ проводникахъ. Несмотря на то, что къ точности измѣреній при этихъ опытахъ были предъявлены самыя строгія требованія, ни одного исключенія изъ этого закона обнаружено не было.

21. Магнитное поле тока.— Въ основномъ опытѣ электромагнитной индукціи тока, описанномъ въ § 17, мы уже имѣли дѣло съ магнитнымъ полемъ электрическаго тока и наблюдали его дѣйствіе на внесенную въ него магнитную стрѣлку. Мы видѣли, что магнитное поле это перпендикулярно направленію проводника съ токомъ. Для того, чтобы ближе ознакомиться съ характеромъ магнитнаго поля тока и съ формою магнитныхъ линій, составляющихъ его, можно воспользоваться тѣмъ же способомъ, какимъ мы уже изслѣдовали магнитное поле магнитовъ, именно примѣпить желѣзные опилки и получить, такимъ образомъ, *магнитный спектръ тока.* Такъ какъ магнитное поле вообще говоря перпендикулярно току, то, слѣдовательно, магнитныя линіи лежатъ въ плоскостяхъ перпендикулярныхъ къ проводнику. Это конечно справедливо лишь постольку, поскольку мы имѣемъ дѣло съ простѣйшими формами проводника, напримѣръ, въ случаѣ прямолинейнаго проводника, вѣрнѣе сказать, прямолинейнаго участка цѣпи. Въ случаѣ же какой-либо сложной формы проводника поле можетъ оказаться и не строго перпендикулярнымъ къ проводнику. Итакъ, обратившись ради простоты къ прямолинейному участку цѣпи, по которой идетъ токъ, мы можемъ слѣдующимъ образомъ расположить опытъ полученія магнитнаго спектра тока. Беремъ кусокъ картона SS (рис. 18), пропускаемъ черезъ отверстіе въ картонѣ изслѣдуемый прямолинейный участокъ AB электрической цѣпи и располагаемъ всю

систему такимъ образомъ, чтобы проводникъ былъ какъ разъ перпендикуляренъ къ плоскости SS, въ которой должны въ такомъ случаѣ лежать магнитныя линіи тока. Далѣе посыпаемъ картонъ желѣзными опилками и въ то время, какъ по AB идетъ токъ, встряхиваемъ ихъ, слегка постукивая по картону. Получающаяся при этомъ картина магнитнаго спектра показываетъ намъ, что *магнитныя линіи прямолинейнаго тока представляютъ собою концентрическіе круги, центры которыхъ лежатъ на оси проводника.* Кромѣ того мы въ данномъ случаѣ воочію убѣждаемся въ томъ, что магнитныя линіи дѣйствительно суть замкнутыя кривыя, и, такимъ образомъ, принципъ непрерывности магнитнаго потока (§ 13) распространяется и на магнитное поле тока. И это справедливо, какъ показываетъ непосредственный опытъ, во всѣхъ рѣшительно случаяхъ магнитнаго поля тока. Какъ бы ни былъ сложенъ контуръ тока, какъ бы ни была сложна форма получающихся при этомъ магнитныхъ линій, мы всегда неизмѣнно имѣемъ дѣло съ замкнутыми магнитными линіями. При этомъ замѣчательно еще слѣдующее обстоятельство. Каждая магнитная линія обязательно охватываетъ кругомъ проводникъ съ токомъ. Въ магнитномъ полѣ тока нѣтъ магнитныхъ линій, сквозь контуръ которыхъ не проходилъ бы электрическій токъ. И если принять еще во вниманіе, что и электрическая цѣпь всегда обязательно представляетъ собою тоже замкнутый контуръ, то мы приходимъ къ выводу, что *электрическій токъ и образуемый имъ магнитный потокъ связаны между собою, какъ звенья цѣпи.*

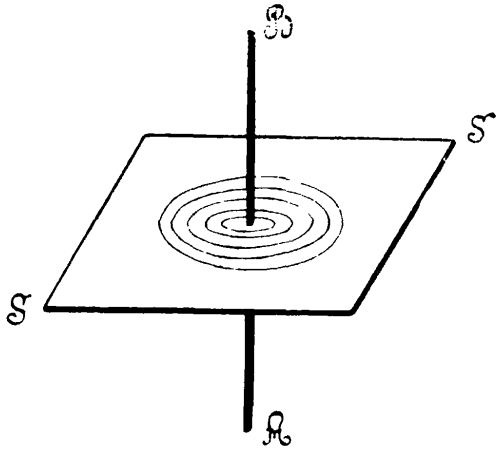


Рис. 18.

22. Направленіе тока и электродвижущей силы. — Въ вопросѣ о магнитномъ полѣ тока есть еще одно существенное обстоятельство, которое мы до сихъ поръ оставляли безъ вниманія. Рѣчь идетъ о направленіи этого магнитнаго поля. Опытъ, производимый хотя бы въ той простѣйшей формѣ, которая схематически представлена на рис. 17, показываетъ намъ, что направленіе магнитнаго поля можетъ быть двоякое: магнитная стрѣлка $N'S'$ отклоняется отъ положенія равновѣсія то въ одну, то въ другую сторону въ зависимости отъ того, въ какую сторону

движется проводникъ P, перерѣзающій магнитный потокъ. Изъ этого мы должны заключить, что электрическій токъ есть процессъ, имѣющій въ проводникѣ нѣкоторое опредѣленное направленіе, одно изъ двухъ возможныхъ (въ зависимости отъ обстоятельствъ). Конечно то же самое направленіе мы должны приписать и э.-д. с., создающей токъ. Итакъ во всякой замкнутой цѣпи электрическій токъ можетъ имѣть одно или другое направленіе, и каждому направленію тока соотвѣтствуетъ совершенно опредѣленное направленіе связаннаго съ ними магнитнаго поля. Остается условиться въ томъ, какое именно направленіе принимать въ каждомъ частномъ случаѣ за направленіе тока. Вслѣдствіе нашей недостаточной освѣдомленности въ области механизма того процесса, который мы называемъ электрическимъ токомъ, мы можемъ только совершенно условно взять то или иное направленіе за направленіе тока.

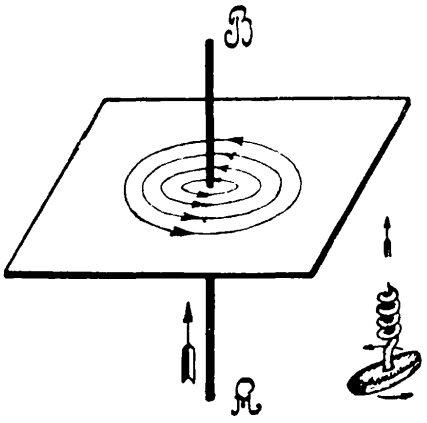


Рис. 19.

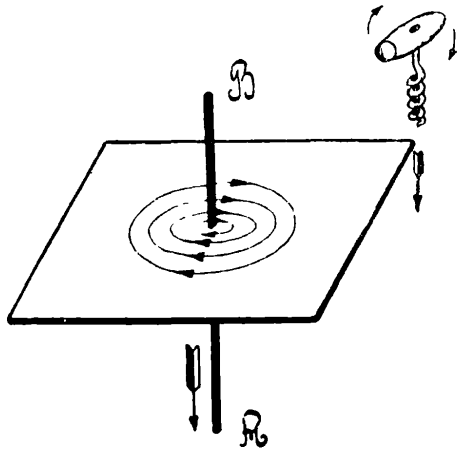


Рис. 20.

За направленіе тока въ проводникѣ принято считать то направленіе, въ которомъ двигалась бы ось винта штопора, если бы рукоятка его вращалась въ направленіи магнитнаго поля, существующаго вокругъ проводника.

Такимъ образомъ, въ опытѣ, представленномъ на рис. 18, направленіе тока мы будемъ считать отъ A къ B или отъ B къ A, въ зависимости отъ того, будетъ ли поле при взглядѣ на картонъ сверху казаться намъ направленнымъ противъ часовой стрѣлки или по часовой стрѣлкѣ. Рисунки 19 и 20 поясняютъ вышесказанное. Для ясности въ обоихъ случаяхъ направленіе поля и соотвѣтствующее ему согласно *правилу штопора* направленіе электрическаго тока показаны при помощи стрѣлокъ.

Съ цѣлью лучшаго ознакомленія съ правиломъ штопора, являющимся весьма важнымъ, основнымъ условіемъ въ ученіи

объ электрическомъ токѣ, разсмотримъ еще нѣсколько рисунковъ. На рис. 21 и 22 изображены кругами замкнутыя магнитныя линіи тока, при чемъ самый токъ предполагается перпендикулярнымъ къ плоскости чертежа въ обоихъ случаяхъ. Въ центрѣ изображены сѣченія проводниковъ. На рис. 21 магнитныя линіи направлены по часовой стрѣлкѣ. Правило штопора говоритъ намъ, что въ настоящемъ случаѣ токъ течетъ отъ читателя по ту сторону чертежа. Это направленіе условно изображается знакомъ $\times$ (таковъ видъ перьевъ сзади стрѣлы, выпущенной изъ лука). На рис. 22 поле направлено обратно часовой стрѣлкѣ. Согласно правилу штопора токъ въ этомъ случаѣ течетъ изъза плоскости чертежа къ намъ. Условно это направленіе изображаютъ точкой (когда стрѣла летитъ къ намъ, то мы прежде всего видимъ острый конецъ—точку).

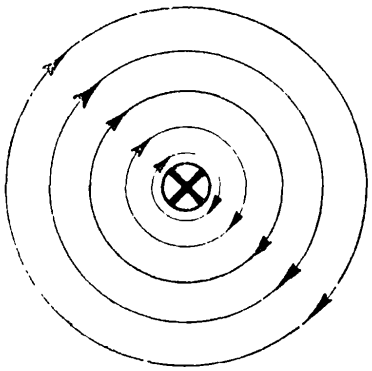


Рис. 21.

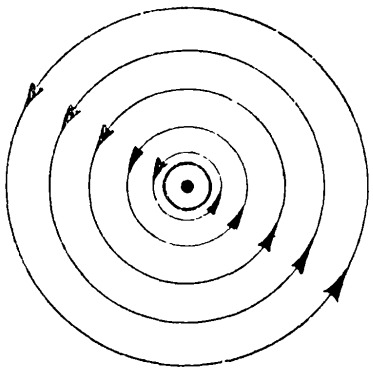


Рис. 22.

На рис. 23 представлена картина магнитнаго поля кругового тока. Получить эту картину можно чисто опытнымъ путемъ, примѣняя для данной цѣли знакомый намъ методъ желѣзныхъ опилковъ. При этомъ листъ картона, въ плоскости котораго получаемъ магнитныя линіи, надо разложить перпендикулярно плоскости кругового тока такъ, чтобы онъ пересѣкалъ эту плоскость по діаметру кругового проводника. Какъ видимъ, магнитныя линіи сцѣпляются съ контуромъ тока, какъ звенья цѣпи. Изъ этого же рисунка можно усмотрѣть, что правило штопора будетъ справедливо и въ такой формѣ.

Направленіе тока есть то направленіе, въ которомъ надо вращать рукоятку штопора для того, чтобы ось его винта двигалась вдоль магнитныхъ линій, пронизывающихъ контуръ тока.

Соединяя объ формулировки правила штопора въ одну, мы можемъ сказать:

Направленіе тока и направленіе производимаго имъ магнитнаго потока взаимно связаны между собою тѣмъ самымъ соотношеніемъ, которое существуетъ между поступательнымъ движеніемъ оси винта штопора и вращательнымъ движеніемъ его рукоятки.

Практически направленіе тока легко опредѣляется при помощи магнитной стрѣлки. Внося магнитную стрѣлку въ сферу дѣйствія магнитнаго поля тока, мы по ея направленію можемъ составить себѣ представленіе о направленіи самого магнитнаго поля (рис. 24). Затѣмъ конечно нетрудно, примѣняя правило штопора, опредѣлить и направленіе тока.

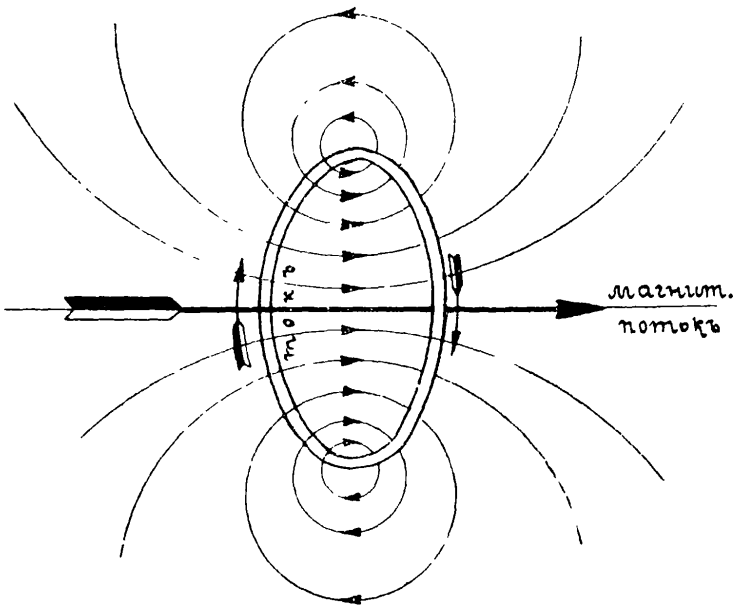


Рис. 23.

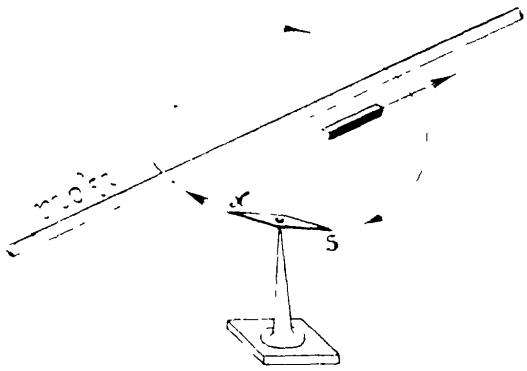


Рис. 24.

23. Электромагнитная индукція. Направленіе тока и электродвижущей силы.—Разъ только мы приняли условіе относительно связи между направленіемъ электрическаго тока и направленіемъ магнитнаго поля этого тока, мы тотчасъ же можемъ изслѣдовать, какого направленія получается въ каждомъ частномъ случаѣ индуктированный токъ или индуктированная э. д. с., что конечно одно и то же. Съ этою цѣлью мы опять обратимся къ нашему основному опыту, описанному въ § 17. Изучая детально условія возникновенія индуктированнаго тока, мы убѣждаемся, что направленіе тока всегда находится въ строго опредѣленномъ геометрическомъ соотношеніи съ направленіемъ внѣшняго магнитнаго поля, пересѣкаемаго проводникомъ, и направленіемъ движенія проводника. Это соотношеніе обычно формулируется въ видѣ особыхъ мнемоническихъ правилъ. Однимъ изъ наиболѣе простыхъ и удобныхъ для практическихъ приложеній является данное Флемингомъ такъ называемое *правило правой руки*. Для того, чтобы примѣнить это правило, необходимо прежде всего

расположить три первыхъ пальца правой руки (большой, указательный и средній) по тремъ взаимно-перпендикулярнымъ направленіямъ (рис. 25). Затѣмъ надо поступить слѣдующимъ образомъ:

Большой (первый) палецъ направляютъ въ сторону движенія проводника, указательный (второй) — вдоль поля; тогда средній (третій) палецъ опредѣляетъ направленіе индуктированнаго тока.

При примѣненіи правила правой руки полезно помнить, что три основныхъ направленія—Движенія, Поля и Тока—располагаются въ алфавитномъ порядкѣ (*Д*, *П*, *Т*) вдоль перваго, второго и третьяго пальцевъ.

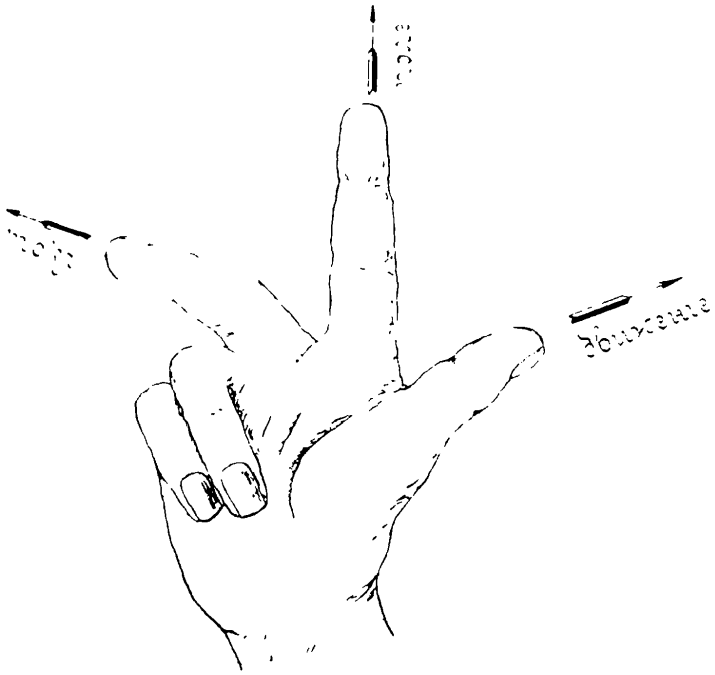


Рис. 25.

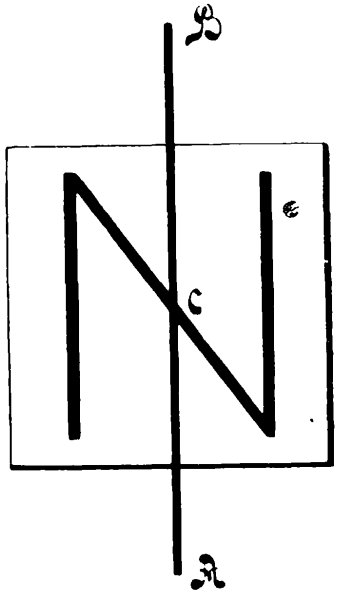


Рис. 26.

Не лишено практическаго значенія и легко запоминается еще нижеслѣдующее правило, данное Сильванусомъ Томпсономъ. Представимъ себѣ, что мы смотримъ навстрѣчу магнитнымъ линіямъ внѣшняго поля. Все происходитъ слѣдовательно такъ, какъ будто-бы мы смотримъ на сѣверный полюсъ. Представимъ себѣ далѣе, что на обращенной къ намъ поверхности этого полюса изображена буква N (рис. 26). Проводникъ *AB*, составляющій часть замкнутой цѣпи и пересѣкающій въ данномъ случаѣ магнитный потокъ, исходящій изъ полюса N, долженъ быть расположенъ параллельно боковымъ линіямъ буквы N, т. е. въ данномъ случаѣ вертикально. Этотъ проводникъ будетъ пересѣкать въ нѣкоторой точкѣ *C* наклонную линію буквы N. И

эта точка C будетъ двигаться вверхъ или внизъ, если проводникъ начнетъ двигаться влѣво или вправо, перерѣзывая при этомъ магнитныя линіи. Направленіе индуктированнаго тока совпадаетъ съ направленіемъ движенія точки C. Пользуясь правиломъ правой руки, нетрудно убѣдиться въ справедливости этого правила Сильвануса Томпсона.

24. Генераторы тока, основанные на явленіи электромагнитной индукціи.—Выше, въ § 17, мы указывали уже, что въ схемѣ основного опыта электромагнитной индукціи часть проводника P вмѣстѣ съ неподвижнымъ магнитомъ NS представляютъ собою генераторъ тока въ теоретически простѣйшей формѣ. Основныя части этого генератора неизмѣнно встрѣчаются во всѣхъ примѣняющихся на практикѣ генераторахъ этого класса, называемыхъ обычно *динамомашинами* или просто *динамо*. Въ каждой подобной машинѣ необходимъ прежде всего магнитъ, создающій основное магнитное поле, индуктирующее токъ при перерѣзываніи его проводникомъ. Поэтому основной магнитъ динамомашины называютъ *индукторомъ*. Въ полѣ этого индуктора обычно вращается болѣе или менѣе сложная комбинація проводниковъ, которые при вращеніи все время рѣжутъ магнитныя линіи индуктора и въ которыхъ вслѣдствіе этого появляется индуктированная э.-д. с. Подобная система проводниковъ называется *арматурой* или *якоремъ* динамомашины. При посредствѣ спеціальныхъ приспособленій, о которыхъ будетъ рѣчь впереди, проводники якоря, такъ называемая *обмотка якоря*, приключаются къ неподвижнымъ внѣшнимъ проводникамъ. Такимъ образомъ создается замкнутая цѣпь электрическаго тока. Изъ сущности явленія электромагнитной индукціи совершенно ясно, что практически безразлично, вращается ли арматура въ полѣ неподвижнаго индуктора или, наоборотъ, арматура неподвижна, а вращается индукторъ со своимъ полемъ. Важно лишь относительное движеніе арматуры и индуктора для того, чтобы имѣло мѣсто пересѣченіе магнитныхъ линій. На практикѣ встрѣчаются какъ машины съ неподвижными арматурами и вращающимися индукторами, такъ и машины съ неподвижными индукторами и вращающимися арматурами.

Въ томъ элементарномъ генераторѣ тока, который представленъ на рис. 17, «арматура» P не приспособлена для вращенія въ полѣ индуктора NS. Если мы желаемъ индуктировать токъ въ цѣпи неопредѣленно долгое время, то очевидно мы для этого

должны будемъ попеременно сообщать проводнику P поступательное движеніе то въ одну, то въ другую сторону. На основаніи всего сказаннаго въ предыдущемъ § понятно, что въ этомъ случаѣ мы не будемъ имѣть въ нашей цѣпи тока неизмѣннаго направленія. Направленіе э.-д. с. и, слѣдовательно, тока будетъ мѣняться въ цѣпи всякій разъ, когда измѣняется направленіе движенія проводника P. Такимъ образомъ, мы получимъ въ данномъ случаѣ *перемѣнный токъ*. Практически динамомашины перемѣннаго тока или такъ называемые *альтернаторы* строются такъ, чтобы движеніе въ нихъ было вращательнымъ. На рис. 27 показано устройство подобнаго альтернатора въ самыхъ, конечно, общихъ чертахъ. Здѣсь N и S представляютъ собою полюсныя части индуктора. Магнитный потокъ исходитъ изъ части N и входитъ въ часть S. Въ междуполюсномъ пространствѣ помѣщается арматура, которая ради упрощенія схемы показана состоящею изъ одного только витка $ABCD$. Эта арматура можетъ вращаться вокругъ оси OO', перпендикулярной магнитному полю. Для установленія непрерывной связи вращающейся арматуры съ неподвижной внѣшней частью электрической цѣпи Q концы обмотки арматуры присоединяются къ двумъ металлическимъ кольцамъ K_1 и K_2, такъ называемымъ контактнымъ кольцамъ, насаженнымъ на ось. О внѣшнюю поверхность контактныхъ колецъ опираются неподвижныя металлическія упругія пластинки или проволочныя щетки S_1 и S_2, къ которымъ далѣе присоединяются при посредствѣ какихъ либо зажимовъ концы внѣшней цѣпи Q. При вращеніи арматуры щетки трутся о поверхность колецъ и такимъ образомъ получается непрерывно замкнутая металлическая цѣпь. Пользуясь правиломъ правой руки или правиломъ Сильвануса Томпсона, нетрудно прослѣдить направленіе индуктируемыхъ э.-д. с. и тока за время одного полнаго оборота арматуры. Мы увидимъ, что въ теченіе одного полуоборота, когда, напримѣръ, проводъ AB обращенъ къ полюсу N, при указанномъ на рисункѣ направленіи вращенія

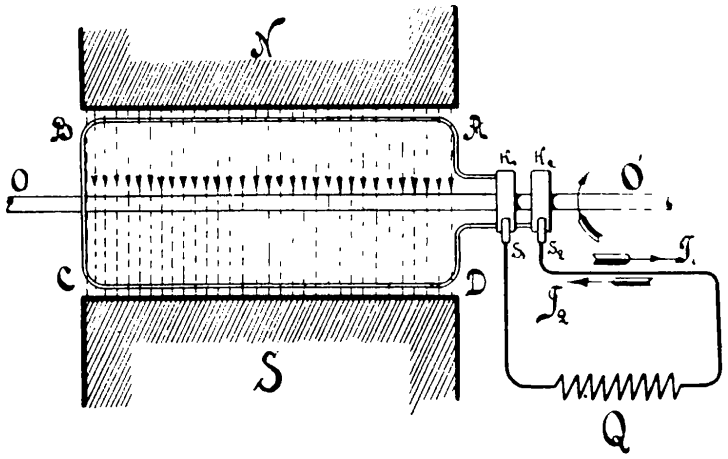


Рис. 27.

токъ во всей цѣпи будетъ имѣть направленіе, указанное стрѣлкой T_1. Въ теченіе другого полуоборота, когда проводъ AB обращенъ къ полюсу S, направленіе тока будетъ обратное, указываемое стрѣлкою T_2. Такимъ образомъ одному полному обороту нашего простѣйшаго альтернатора соотвѣтствуетъ полный циклъ измѣненій э.-д. с. и тока, или, какъ говорятъ, *полный періодъ* перемѣннаго тока.

Въ случаѣ, если бы мы пожелали имѣть въ цѣпи токъ неопредѣленно долго текущій по одному неизмѣнному направленію, то при использованіи явленія электромагнитной индукціи не остается обычно никакого иного средства, какъ переключеніе соединенія между арматурой и внѣшней цѣпью въ тотъ именно моментъ, когда э.-д. с. въ арматурѣ мѣняетъ свой знакъ. Въ машинѣ, представленной на рис. 27, потребовалось бы для этой цѣли два переключенія за время одного оборота. Практически, обыкновенно подобное переключеніе производится автоматически путемъ измѣненія конструкціи того контактнаго приспособленія, при помощи котораго устанавливается связь между арматурой и внѣшней цѣпью. Именно вмѣсто контактныхъ колецъ присоединяютъ концы обмотки арматуръ къ двумъ половинкамъ металлическаго цилиндра, разрѣзаннаго діаметральной плоскостью. Эти полуцилиндры Z_1 и Z_2 (рис. 28) изолированы другъ отъ друга и насажены на ось арматуры такимъ образомъ, что въ концѣ концовъ опять составляютъ полный цилиндръ. Ясно, что при вращеніи всей системы каждый изъ полуцилиндровъ Z_1 и Z_2 будетъ поочередно приходить въ соприкосновеніе то съ одной щеткой, то съ другой. И это будетъ происходить синхронно съ измѣненіями направленія индуктированной э.-д. с., благодаря чему во внѣшней цѣпи будетъ протекать токъ постояннаго направленія. Такъ, напримѣръ, въ нашемъ случаѣ, при указанномъ на рис. 28 направленіи вращенія со щеткой S_2 будетъ соприкасаться полуцилиндръ Z_2, пока въ арматурѣ будетъ индуктироваться э.-д. с. въ направленіи $ABCD$. Измѣненіе на-

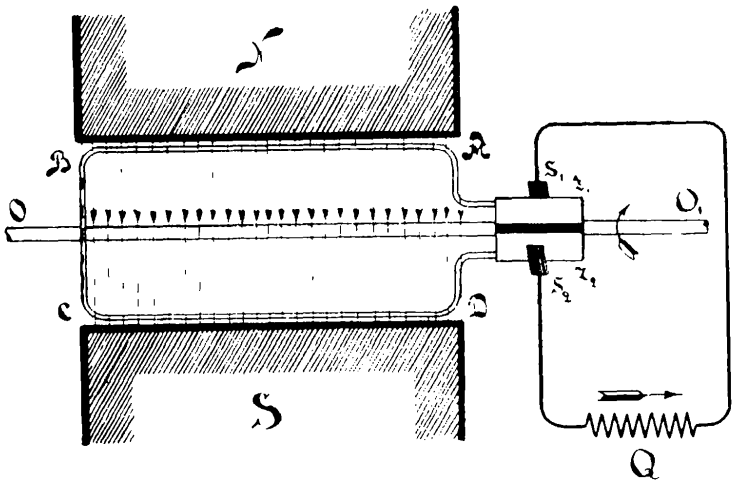


Рис. 28.

правленія этой э.-д. с. произойдетъ въ тотъ моментъ, когда витокъ $ABCD$ будетъ проходить черезъ положеніе, перпендикулярное направленію главнаго магнитнаго потока, и въ это же самое время произойдетъ переключеніе щетокъ: теперь со щеткой S_2 будетъ соприкасаться полуцилиндръ Z_1. Такъ какъ въ этомъ случаѣ э.-д. с. будетъ индуктироваться въ направленіи $DCBA$, то слѣдовательно во внѣшней цѣпи направленіе тока не измѣнится и т. д.

Въ разобранномъ только что случаѣ получается токъ постоянный только по направленію. Что же касается его силы, то она будетъ измѣняться, пульсируя, вообще говоря, между нулемъ и нѣкоторымъ максимумомъ. Это должно происходить отъ того, что э.-д. с. въ цѣпи періодически измѣняетъ свое направленіе и слѣдовательно въ моменты перехода отъ положительныхъ значеній къ отрицательнымъ или обратно дѣлается равной нулю. На практикѣ стараются избѣгнуть этихъ пульсацій тока примѣненіемъ болѣе или менѣе сложной комбинаціи проводовъ въ арматурѣ и усложненіемъ процесса переключенія, называемаго коммутаціей. Нашей задачей въ настоящемъ случаѣ не является детальное изученіе всевозможныхъ конструкцій динамомашинъ, мы стремимся только къ тому, чтобы составить себѣ правильное общее представленіе о работѣ динамомашинъ. Въ виду этого мы ограничимся описаніемъ динамомашины Грамма, который первый осуществилъ машину, дающую въ значительной степени постоянный токъ.

На рис. 29 представлены схематически основные органы машины Грамма. Арматурою этой машины служитъ такъ называемое кольцо Грамма. Оно состоитъ изъ желѣзнаго кольца, равномѣрно обмотаннаго изолированной проволокой, при чемъ концы этой проволоки спаяны, такъ что получается вполнѣ замкнутая на себя обмотка. Кольцо Грамма помѣщается между полюсами индуктора NS и можетъ вращаться вокругъ оси O, перпендикулярной плоскости кольца и направленію магнитнаго поля. Въ виду того, что магнитная проницаемость желѣза во много разъ больше магнитной проницаемости воздуха, въ первомъ приближеніи можно принять, что магнитный потокъ, идущій изъ полюса N въ полюсъ S, не попадаетъ въ полость внутри желѣзнаго кольца, а проходитъ почти исключительно по желѣзу, развѣтвляясь на двѣ части, какъ это показано пунктиромъ на рисункѣ. Благодаря этому при вращеніи кольца Грамма магнит-

ныя линіи перерѣзываются только тѣми частями обмотки, которыя расположены снаружи кольца. Представимъ себѣ теперь, что эти внѣшнія части обмотки съ открытой стороны очищены отъ изоляціи, такъ что можетъ устанавливаться контактъ между обмоткой и нажатыми снаружи щетками S_1 и S_2, расположенными перпендикулярно линіи полюсовъ. Нетрудно видѣть, что при вращеніи кольца Грамма во всѣхъ виткахъ лѣвой половины обмотки получаются отдѣльныя э.-д. силы одного знака, такъ что онѣ суммируются и даютъ полную э.-д. силу, индуктируемую въ лѣвой половинѣ кольца. Совершенно такъ же получаемъ и для правой половины. Но оказывается, что э. д. силы, возникающія въ правой и лѣвой половинахъ кольца Грамма, дѣй-

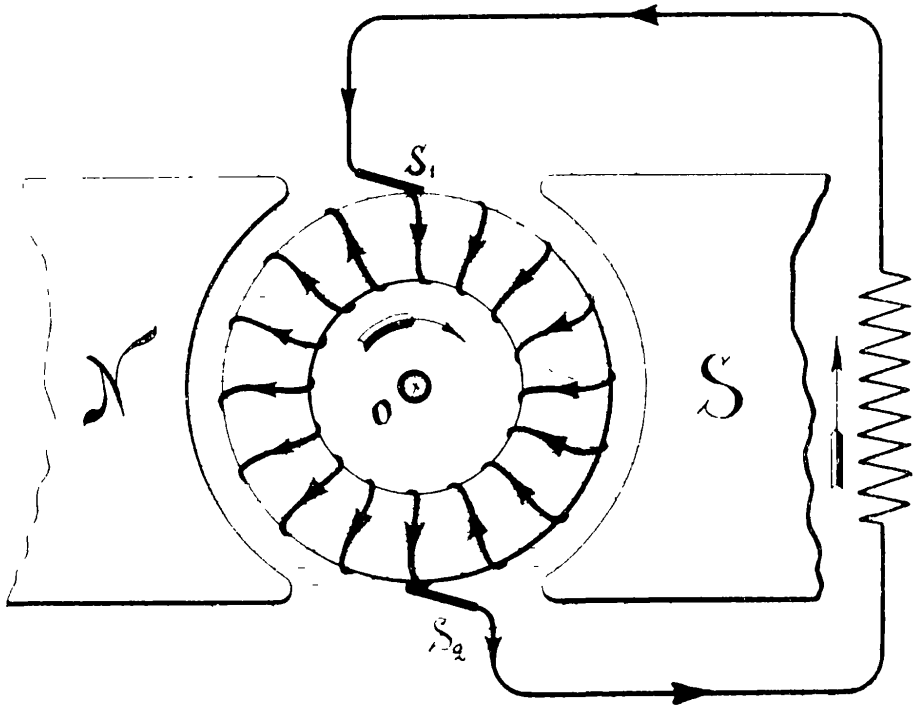


Рис. 29.

ствуютъ въ обмоткѣ одна навстрѣчу другой. И слѣдовательно, если бы наша цѣпь состояла только изъ обмотки арматуры, то въ этой послѣдней не получилось бы совсѣмъ тока въ виду полной симметріи правой и лѣвой половинъ машины и проистекающаго отсюда равенства по абсолютной величинѣ двухъ антагонирующихъ э.-д. силъ. Но такъ какъ къ обмоткѣ арматуры присоединяется внѣшняя цѣпь Q при помощи щетокъ S_1 и S_2, расположенныхъ какъ разъ на линіи, разграничивающей области дѣйствія одной и другой э.-д. силы, то эти э.-д. силы, дѣйствуя параллельно, возбуждаютъ во внѣшней цѣпи токъ. Внутри же арматуры этотъ токъ раздѣляется на двѣ равныя части соотвѣтственно двумъ половинамъ кольца Грамма, и двумъ самостоятель-

нымъ э.-д. силамъ. На рис. 29 стрѣлками показано направленіе тока во всѣхъ частяхъ нашей сложной цѣпи при вращеніи арматуры по часовой стрѣлкѣ. Ясно, конечно, что на какой бы уголъ ни повернулось кольцо Грамма, общія условія возникновенія э.-д. силы и тока, разобранныя выше, остаются неизмѣнными. Происходитъ только непрерывная смѣна элементовъ обмотки, приходящихъ въ непосредственное соприкосновеніе со щетками. Такимъ образомъ, равномѣрно вращая кольцо Грамма, мы можемъ сколь угодно долго генерировать постоянный токъ.

Практически обыкновенно рѣдко прибѣгаютъ къ тому способу коммутаціи, который мы только что описали. Вмѣсто того, чтобы очищать отъ изоляціи наружныя части обмотки арматуры, чаще устраивается спеціальный органъ, называемый *коллекто-*

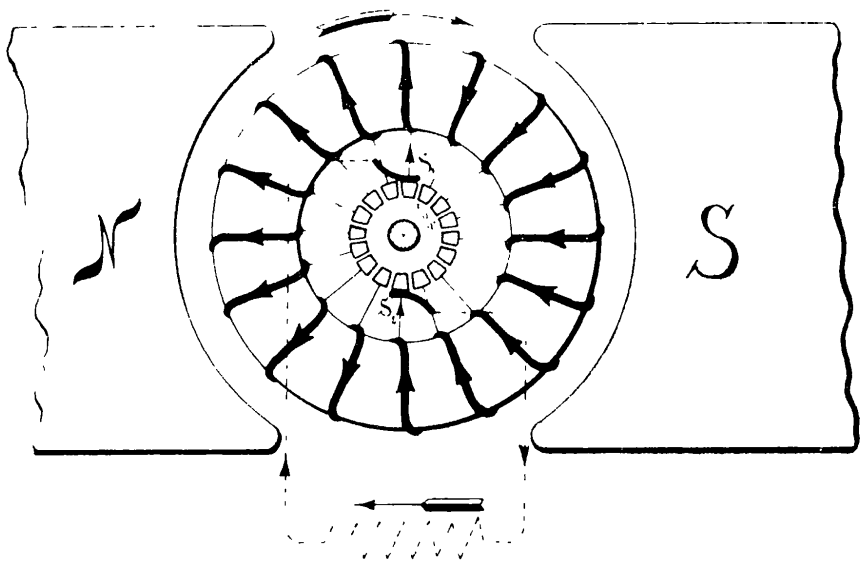


Рис. 30.

ромъ и предназначенный для установленія надлежащаго сообщенія между обмоткой арматуры и внѣшней цѣпью. На рис. 30 представлена схема машины Грамма съ коллекторомъ. Этотъ послѣдній состоитъ изъ отдѣльныхъ, изолированныхъ одна отъ другой, мѣдныхъ или бронзовыхъ пластинокъ a, a', a'' и т. д., расположенныхъ параллельно оси арматуры и представляющихъ въ совокупности цилиндръ. Каждая пластинка коллектора сообщается металлически съ мѣстомъ соединенія двухъ сосѣднихъ элементовъ обмотки, такъ называемыхъ секцій. Въ настоящемъ примѣрѣ каждая секція состоитъ изъ одного только витка, но обычно въ составъ секціи входитъ нѣсколько витковъ. Щетки S_1 и S_2 прижимаются къ поверхности коллектора. Въ каждый данный моментъ служатъ только тѣ пластины его, которыя ока-

зываются подъ щетками. Въ теченіе одного полнаго оборота арматуры всѣ пластины коллектора перебываютъ подъ каждой изъ щетокъ. Все остальное въ данномъ случаѣ происходитъ такъ же, какъ и въ случаѣ, представленномъ на рис. 29.

Первоначально въ качествѣ индукторовъ для динамомашинъ примѣняли стальные магниты. Пока размѣры машинъ были невелики, это было практически осуществимо. Строить же большія машины со стальными магнитами было бы слишкомъ дорого и кромѣ того еще по нѣкоторымъ причинамъ неудобно. Въ виду этого въ настоящее время въ качествѣ индукторовъ динамомашинъ почти исключительно пользуются такъ называемыми *электромагнитами*, устройство которыхъ описано въ слѣдующемъ §.

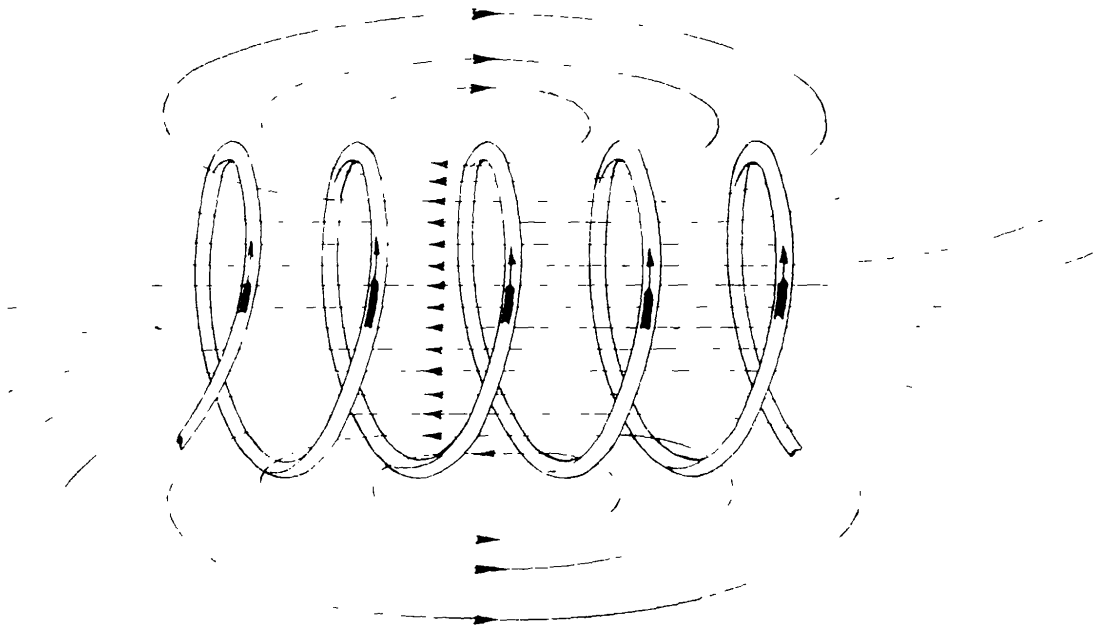


Рис. 31.

25. Электромагниты.—Мы знаемъ, что кусокъ желѣза, будучи помѣщенъ въ магнитное поле, пріобрѣтаетъ свойства магнита, т. е. намагничивается (§ 14). Слѣдовательно, если мы возьмемъ кусокъ желѣза, совершенно лишенный свойствъ магнита, и расположимъ его вблизи проводника, по которому течетъ электрическій токъ, то этотъ кусокъ желѣза намагнитится. Мы получимъ такимъ образомъ искусственный магнитъ, свойства котораго обусловливаются существованіемъ электрическаго тока. Послѣднее обстоятельство даетъ поводъ называть подобные магниты *электромагнитами*.

Практически при устройствѣ электромагнитовъ проводнику, по которому течетъ возбуждающій токъ, стремятся придать наиболѣе благопріятную форму въ смыслѣ образованія силь-

наго магнитнаго поля. Это необходимо для того, чтобы получить сильные электромагниты. Съ этой цѣлью обычно обматываютъ изолированную проволоку вокругъ желѣзнаго сердечника. Другими словами, помѣщаютъ желѣзный сердечникъ внутри катушки, состоящей изъ изолированной проволоки. Магнитное поле подобной катушки имѣетъ видъ, представленный на рис. 31. Въ данномъ случаѣ магнитныя линіи, обычно охватывающія одинъ только проводъ, сливаются въ общій для ряда витковъ потокъ, который сильно сконцентрированъ внутри катушки. Итакъ, если кусокъ желѣза въ видѣ стержня или полосы помѣстить внутри катушки, по которой протекаетъ электрическій токъ, то мы получаемъ всѣ условія, необходимыя для намагни-

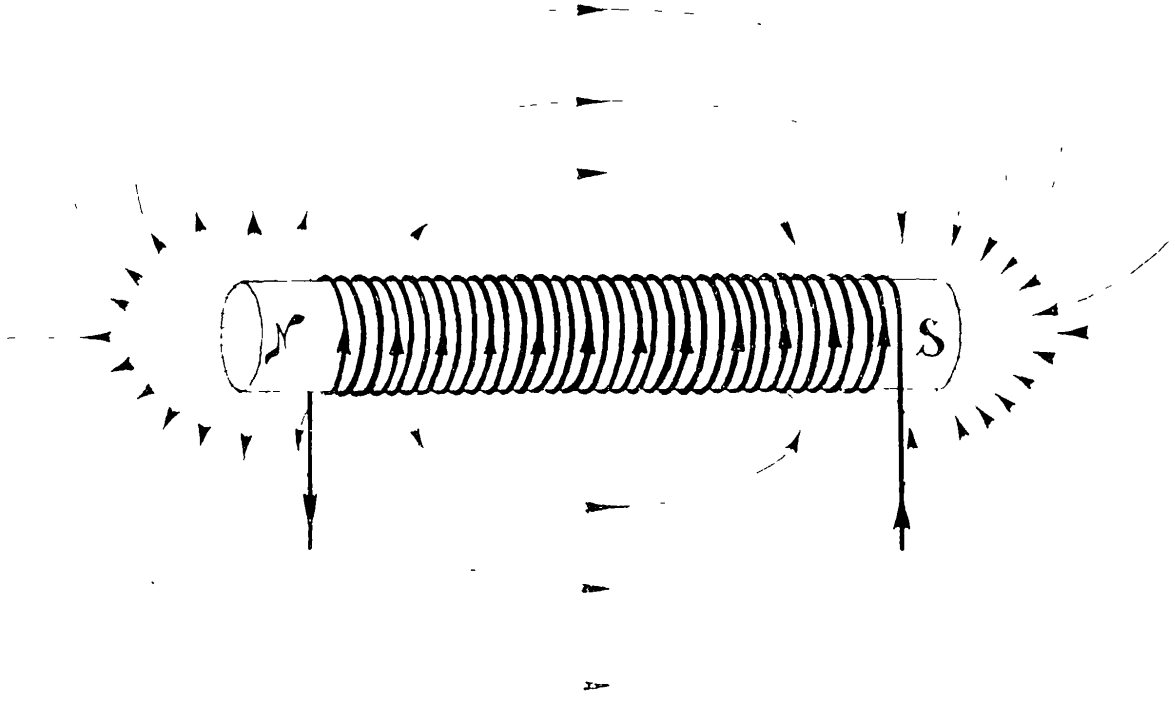


Рис. 32.

ченія этого куска желѣза. Получаемъ такимъ образомъ прямолинейный электромагнитъ, магнитный спектръ котораго, вообще говоря, вполнѣ подобенъ спектру стальнаго магнита тѣхъ же геометрическихъ размѣровъ (рис. 32). Иногда оказывается полезнымъ придавать желѣзному сердечнику форму подковы, и такимъ образомъ получаютъ общеупотребительный *подковообразный электромагнитъ*, схема обмотки котораго представлена на рис. 33.

Въ предыдущемъ § мы уже указали на одно изъ приложеній электромагнита. Именно имъ пользуются въ качествѣ индуктора динамомашины. Въ этомъ случаѣ онъ можетъ быть возбужденъ токомъ отъ самой динамомашины. Подобная комбинація называется самовозбуждающейся динамомашиной. Разнообразіе

прочихъ примѣненій электромагнита неисчислимо. Упомянемъ здѣсь только о примѣненіи его для цѣлей сигнализаціи (телеграфія, телефонія, электрическій звонокъ и т. д.), которая используетъ свойство электромагнита возбуждаться только при пропусканіи тока черезъ его обмотку.

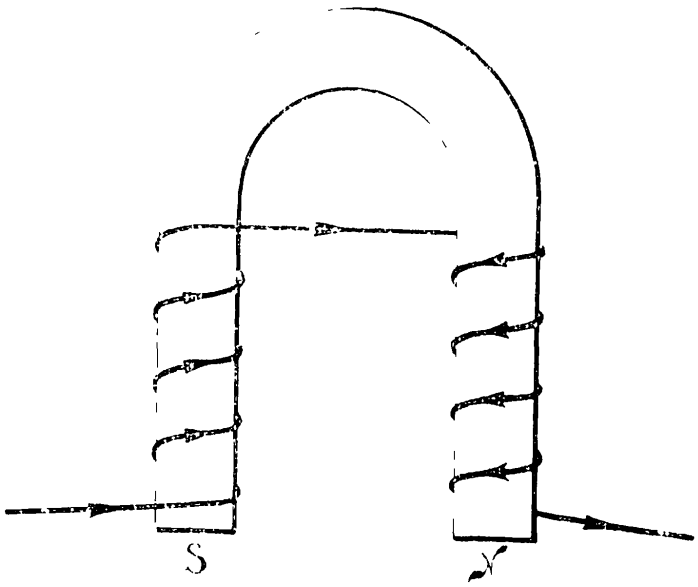


Рис. 33.

26. Электромагнитная сила. — Изъ ряда опытовъ мы убѣдились, что электрическій токъ дѣйствуетъ чисто механически на магнитную стрѣлку, вообще на магнитъ. Какъ мы знаемъ, это происходитъ отъ того, что электрическому току присуще соотвѣтствующее магнитное поле. Съ фарадэевской точки зрѣнія это механическое дѣйствіе является результатомъ особаго процесса въ результирующемъ магнитномъ полѣ, окружающемъ магнитъ, — процесса, который въ данномъ случаѣ обусловливается наложеніемъ другъ на друга или сосуществованіемъ магнитнаго поля тока и магнитнаго поля магнита. Мы можемъ сказать, что наблюдаемое нами дѣйствіе тока на магнитъ есть результатъ взаимодѣйствія двухъ магнитныхъ полей: поля тока и поля магнита. Но всѣ силы взаимодѣйствія всегда имѣютъ двѣ точки, двѣ области приложенія. И при этомъ силы, приложенныя къ двумъ взаимодѣйствующимъ системамъ, равны по абсолютной величинѣ и обратны по направленію. Слѣдовательно и въ разбираемомъ случаѣ взаимодѣйствія тока и магнита мы должны ожидать существованія кромѣ механическихъ силъ, приложенныхъ къ магниту, таковыхъ же, но только обратно направленныхъ силъ, приложенныхъ къ самому

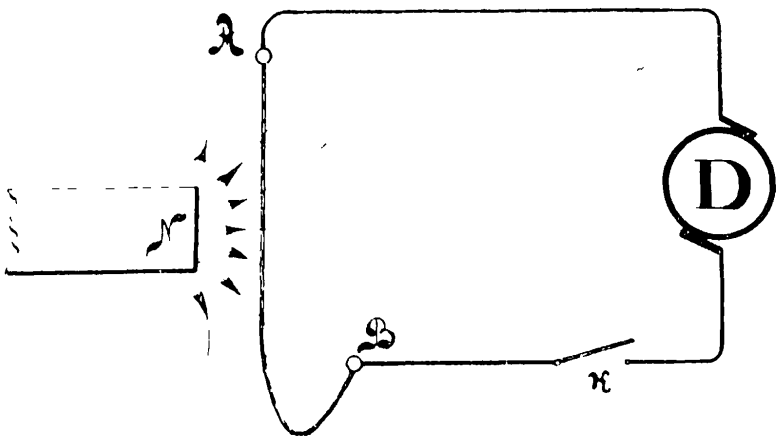


Рис. 34.

электрическому току. Опытъ вполнѣ подтверждаетъ это заключеніе. Легко напримѣръ создать подвижной проводникъ съ токомъ, включая въ цѣпь динамомашины D (рис. 34) гибкій шнуръ AB, свитый изъ отдѣльныхъ очень тонкихъ проволокъ. Если по цѣпи идетъ токъ, то, поднося къ гибкому проводнику магнитъ, мы увидимъ, что этотъ проводникъ начинаетъ двигаться. Можно поставить опытъ и такимъ образомъ: сначала подносимъ магнитъ, т. е. помѣщаемъ проводникъ AB въ поле нѣкотораго магнита, а затѣмъ приводимъ въ движеніе динамомашину и замыкаемъ цѣпь, производя металлическое соединеніе двухъ концовъ ея, напримѣръ, при помощи такъ называемаго включателя K. Какъ только цѣпь замкнется, возникаетъ токъ, и проводникъ AB начнетъ перемѣщаться въ полѣ магнита. Итакъ, проводникъ съ токомъ, будучи помѣщенъ въ постороннее магнитное поле, испытываетъ на себѣ дѣйствіе нѣкоторой механической силы. Эту силу обыкновенно называютъ *электромагнитной силой.*

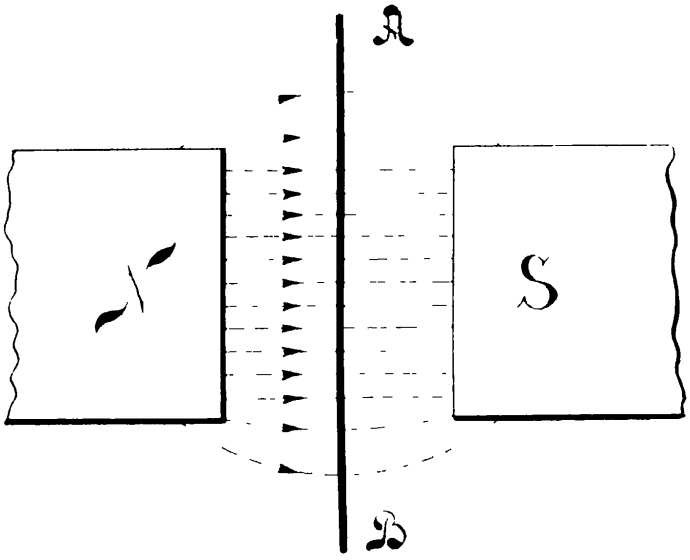


Рис. 35.

Изъ описаннаго опыта легко убѣдиться, что проводникъ съ токомъ стремится двигаться не въ направленіи магнитныхъ линій внѣшняго поля, а какъ разъ перпендикулярно ихъ направленію, т. е. такъ, что при этомъ магнитныя линіи пересѣкаются проводникомъ. Другими словами, *направленіе электромагнитной силы перпендикулярно направленію проводника съ токомъ и направленію магнитныхъ линій внѣшняго поля.* Такимъ образомъ, если мы помѣстимъ проводникъ съ токомъ AB такъ, какъ это показано на рисункѣ 35, то онъ будетъ стремиться двигаться или къ намъ, или отъ насъ, въ зависимости отъ направленія тока, но ни въ коемъ случаѣ не въ направленіи магнитныхъ линій поля магнита NS.

Опытъ показываетъ также, что электромагнитная сила, оставаясь всегда нормальной къ плоскости, опредѣляемой направленіями проводника и поля, въ значительной степени зависитъ отъ величины угла между этими направленіями. Элек-

тромагнитная сила будетъ максимальна, когда уголъ этотъ равенъ 90°, и равна нулю, когда направленія проводника и поля совпадаютъ.

Всѣ эти свойства электромагнитной силы, а также самый фактъ ея возникновенія весьма просто объясняются съ фарадэевской точки зрѣнія. Дѣйствительно, представимъ себѣ, что въ магнитномъ полѣ, которое ради простоты будемъ считать однороднымъ, помѣщенъ перпедикулярно полю прямолинейный проводникъ съ токомъ.

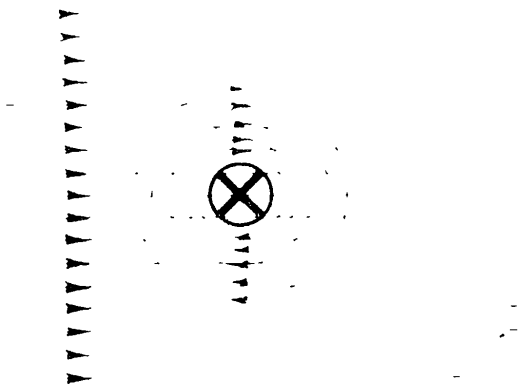


Рис. 36.

На прилагаемомъ рисункѣ 36 внѣшнее магнитное поле изображено горизонтальными прямыми, а концентрическія окружности изображаютъ магнитныя линіи тока, текущаго отъ насъ по проводнику, перпендикулярному къ плоскости чертежа (см. рис. 21). Итакъ мы имѣемъ сосуществованіе двухъ магнитныхъ полей. Какъ видно изъ рис. 36, въ нѣкоторыхъ частяхъ поля, а именно вверху отъ проводника, направленіе магнитныхъ линій тока будетъ совпадать съ направленіемъ линій внѣшняго поля; въ другихъ же частяхъ поля, внизу отъ проводника, эти два направленія будутъ обратны одно другому. Но эти двѣ системы магнитныхъ линій не могутъ одновременно самостоятельно существовать, и на рисунокъ 36 надо смотрѣть лишь какъ на теоретическую схему. Въ дѣйствительности обѣ деформаціи, характеризуемыя соотвѣтствующими системами магнитныхъ линій, тѣмъ или инымъ путемъ сливаются въ одну общую; именно въ данномъ случаѣ въ верхнихъ частяхъ чертежа деформаціи складываются, въ нижнихъ вычитаются. Очевидно, для каждой точки поля можно по правилу параллелограмма построить векторъ, изображающій результирующую деформацію— магнитную индукцію, а затѣмъ нетрудно построить

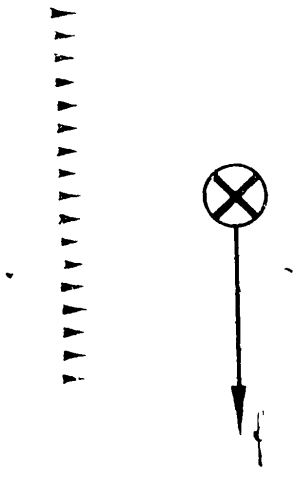


Рис. 37.

и всю новую систему магнитныхъ линій, какъ это сдѣлано на рисункѣ 37. Итакъ, надъ проводникомъ магнитныя линіи будутъ гуще, чѣмъ подъ нимъ. При этомъ онѣ какъ бы изгибаются и удлиняются, охватывая проводникъ сверху. Но мы знаемъ, что, согласно взгляду Фарадея, магнитныя линіи стремятся укоротиться и въ ихъ системѣ наблюдается боковой распоръ, тѣмъ конечно больній, чѣмъ больше густота магнитныхъ линій (см. § 10). Ясно, что благодаря этимъ свойствамъ магнитныхъ линій та часть нашей системы, которая является причиной искаженія однороднаго поля, гдѣ всѣ тяженія были уравновѣшены, должна испытывать давленіе сверху внизъ, какъ это показано стрѣлкой на рис. 37. Это давленіе, эта сила f и есть какъ разъ электромагнитная сила. Изъ всего вышеизложеннаго очевидно, что причину появленія электромагнитной силы надо видѣть въ нарушеніи симметріи магнитнаго поля вокругъ проводника съ токомъ. И надо при этомъ ожидать, что величина электромагнитной силы будетъ тѣмъ больше, чѣмъ будетъ значительнѣе это нарушеніе симметріи. Въ томъ случаѣ, когда направленіе проводника совпадаетъ съ направленіемъ внѣшняго поля, искаженіе этого поля конечно тоже произойдетъ, но картина получающагося результирующаго поля (магнитныя линіи спиралью обвиваются вокругъ проводника) будетъ совершенно симметрична относительно проводника и никакой электромагнитной силы при этомъ наблюдаться не будетъ. Но по мѣрѣ того, какъ уголъ между направленіями внѣшняго поля и проводника будетъ возрастать, будетъ усиливаться и возникающая при этомъ диссимметрія результирующаго поля по отношенію къ проводнику, будетъ увеличиваться и появляющаяся одновременно съ диссимметріей электромагнитная сила. Диссимметрія получится максимальная, когда уголъ между токомъ и внѣшнимъ полемъ достигнетъ 90°. Соотвѣтственно этому въ данномъ случаѣ и величина электромагнитной силы будетъ при прочихъ равныхъ условіяхъ максимальная.

Изъ разсмотрѣнія рисунковъ 36 и 37 ясно, что если бы при томъ же направленіи поля измѣнилось направленіе тока, т. е. если бы токъ шелъ изъ-за плоскости чертежа къ намъ, то должно было бы измѣниться и направленіе электромагнитной силы: проводникъ стремился бы двигаться снизу вверхъ. Вообще въ данномъ случаѣ три направленія: магнитнаго поля, проводника съ токомъ и электромагнитной силы или возникающаго

благодаря ей движенія—связаны между собою совершенно опредѣленнымъ соотношеніемъ. Зная два изъ этихъ трехъ направленій, всегда можно указать третье. Съ этою цѣлью можно воспользоваться, напримѣръ, методомъ построенія картины поля какъ это сдѣлано на рис. 37. На практикѣ часто пользуются болѣе упрощенными формулировками геометрическаго соотношенія трехъ интересующихъ насъ направленій. Между прочимъ очень удобно такъ называемое «*правило лѣвой руки*», аналогичное правилу правой руки. Правило лѣвой руки гласитъ слѣдующее:

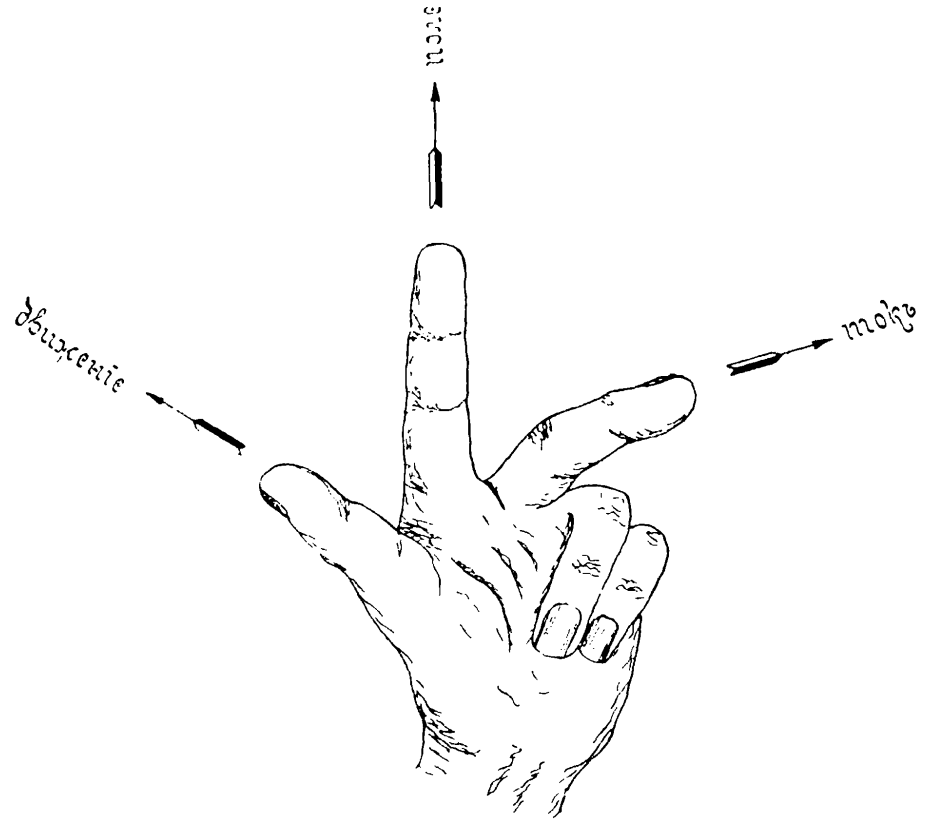


Рис. 38.

Если три пальца лѣвой руки—большой, указательный и средній - расположить по тремъ взаимноперпендикулярнымъ направленіямъ (рис. 38) *и затѣмъ указательный палецъ направить вдоль магнитныхъ линій внѣшняго поля, а средній палецъ вдоль тока въ нѣкоторой части проводника, то направленіе большого пальца дастъ намъ направленіе возникающей электромагнитной силы или движенія данной части проводника.*

При примѣненіи правила лѣвой руки полезно помнить, что здѣсь, какъ и въ правилѣ правой руки, три основныхъ направленія –Движенія, Поля и Тока - располагаются въ алфавитномъ порядкѣ вдоль перваго, второго и третьяго пальцевъ лѣвой руки.

Въ справедливости только что приведеннаго правила нетрудно убѣдиться, сопоставляя его съ рис. 37.

Электромагнитная сила находитъ себѣ широкое примѣненіе въ современной электротехникѣ при устройствѣ электродвигателей. Движеніе въ этихъ послѣднихъ обычно получается благодаря дѣйствію именно электромагнитной силы, для возникновенія которой создаютъ спеціальныя условія: въ магнитное поле, производимое электромагнитомъ, помѣщаютъ подвижные проводники, входящіе въ составъ электрической цѣпи.

27. Гальваноскопы и гальванометры.—При всякаго рода работахъ съ электрическимъ токомъ для обнаруженія его и измѣренія его силы обычно пользуются механическимъ взаимодѣйствіемъ между токомъ и постороннимъ магнитомъ, такъ какъ этотъ методъ позволяетъ весьма просто установить присутствіе и опредѣлить силу магнитнаго поля вокругъ проводника. Уже въ нашемъ основномъ опытѣ электромагнитной индукціи тока (§ 17) мы, пользуясь магнитной стрѣлкой, обнаруживали появленіе тока въ цѣпи при извѣстныхъ условіяхъ. Въ схемѣ, представленной на рис. 17, часть цѣпи Q вмѣстѣ съ магнитною стрѣлкою $N'S'$ можетъ быть разсматриваема, какъ приборъ, служащій для обнаруженія тока. Вообще всѣ приборы, позволяющіе обнаруживать присутствіе тока въ цѣпи и основанные на взаимодѣйствіи тока и магнита, принято называть *гальваноскопами.* Это названіе возникло вслѣдствіе того, что въ прежнее время электрическій токъ обыкновенно называли гальваническимъ токомъ, по имени Гальвани, открывшаго это явленіе Тѣ гальваноскопы, которые снабжены приспособленіями для измѣренія силы взаимодѣйствія тока и магнита и которые, слѣдовательно, даютъ возможность судить и о силѣ тока (см. § 19), называются *гальванометрами.*

Изъ всего того, что было сказано въ предыдущемъ §, ясно, что устройство гальваноскоповъ и гальванометровъ можетъ быть двоякаго рода. Съ одной стороны, можно сдѣлать неподвижнымъ проводникъ, по которому идетъ токъ, и предоставить перемѣщаться магниту; съ другой стороны, можно закрѣпить магнитъ и сообщить подвижность самому проводнику, по крайней мѣрѣ той его части, которая находится въ области поля магнита. Въ приборахъ обоихъ классовъ обыкновенно ради усиленія силъ взаимодѣйствія проводнику придаютъ форму витковъ, иногда очень многочисленныхъ.

На рис. 39 представленъ простѣйшій приборъ перваго рода, т. е. съ подвижнымъ магнитомъ. Онъ состоитъ только изъ одного витка проводника, включаемаго въ электрическую цѣпь при посредствѣ зажимовъ K_1 и K_2. Внутри витка располагается насаженная на остріе магнитная стрѣлка NS. Такъ какъ магнитное поле тока будетъ нормально къ плоскости витка, то передъ пропусканіемъ тока поворачиваютъ гальваноскопъ такъ, чтобы витокъ его проводника находился въ плоскости магнитнаго меридіана, т. е. чтобы привести магнитную стрѣлку въ совпаденіе съ плоскостью витка. Мы такимъ образомъ дѣлаемъ наибольшимъ моментъ пары силъ, дѣйствующихъ на стрѣлку со стороны тока, и потому получаемъ угловое перемѣщеніе стрѣлки наибольшее возможное при данномъ токѣ.

Описанный гальваноскопъ не отличается большою чувствительностью. Для достиженія послѣдней въ приборахъ этого класса примѣняютъ катушки съ очень большимъ числомъ витковъ изолированной проволоки, доходящимъ иногда до десятковъ тысячъ. Кромѣ того для увеличенія той же чувствительности вмѣсто простыхъ магнитныхъ стрѣлокъ примѣняютъ такъ называемыя

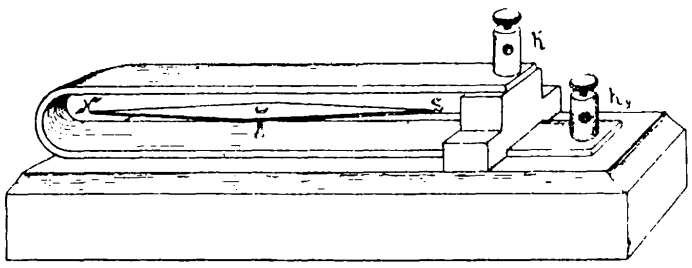


Рис. 39.

астатическія системы стрѣлокъ. Въ видѣ примѣра опишемъ вкратцѣ астатическій гальванометръ В. Томсона. Въ этомъ гальванометрѣ (рис. 40) имѣются двѣ послѣдовательно соединенныя катушки A и B, состоящія изъ очень большого числа витковъ и расположенныя такъ, что токъ проходитъ по нимъ въ противоположныхъ направленіяхъ. Такимъ образомъ, если магнитная сила, производимая токомъ въ центрѣ верхней катушки, направлена отъ плоскости чертежа къ намъ, то сила въ центрѣ нижней катушки будетъ направлена отъ насъ. Два очень малыхъ по размѣрамъ магнита, насаженные на общую ось, помѣщаются соотвѣтственно въ центрахъ катушекъ A и B. Эти магниты находятся въ одной плоскости, но ориентированы въ разныя стороны, т. е. если напримѣръ у верхняго магнита вправо обращенъ сѣверный полюсъ, то у нижняго въ ту же сторону обращенъ южный полюсъ. Если магниты по возможности тождественны, то мы имѣемъ какъ разъ астатическую

систему стрѣлокъ, т. е. такую систему, которая испытываетъ ничтожное направляющее дѣйствіе со стороны земного магнитнаго поля, ибо моменты двухъ паръ силъ, дѣйствующихъ со стороны земного поля на эту систему стрѣлокъ, будутъ направлены въ противоположныя стороны. Слѣдовательно результирующая пара силъ, стремящаяся привести магнитную систему въ нормальное положеніе, т. е. въ плоскость витковъ, можетъ быть очень мала. Система эта подвѣшивается обыкновенно на тончайшей коконовой или кварцевой нити, и потому въ настоящихъ условіяхъ для выведенія системы изъ положенія равновѣсія требуется очень незначительное направляющее дѣйствіе со стороны тока. А такъ какъ магнитныя силы, производимыя токами въ центрѣ обѣихъ катушекъ, направлены въ обратныя стороны, то пары силъ, развиваемыхъ токами, дѣйствуютъ на оба магнита въ одномъ и томъ же направленіи. Такимъ образомъ гальванометръ будетъ очень чувствителенъ. Изъ предыдущаго ясно, что эта чувствительность въ значительной степени достигается уменьшеніемъ направляющаго дѣйствія земного магнитнаго поля на магнитную систему гальванометра. Такъ какъ астатичность системы никогда не можетъ быть полной, то съ цѣлью уменьшенія этого направляющаго дѣйствія земного поля пытаются ослабить самое поле, налагая на него противоположно направленное поле располагаемаго вблизи гальванометра постояннаго магнита. Для этой именно цѣли и служитъ магнитъ NS, расположенный надъ гальванометромъ (рис. 40).

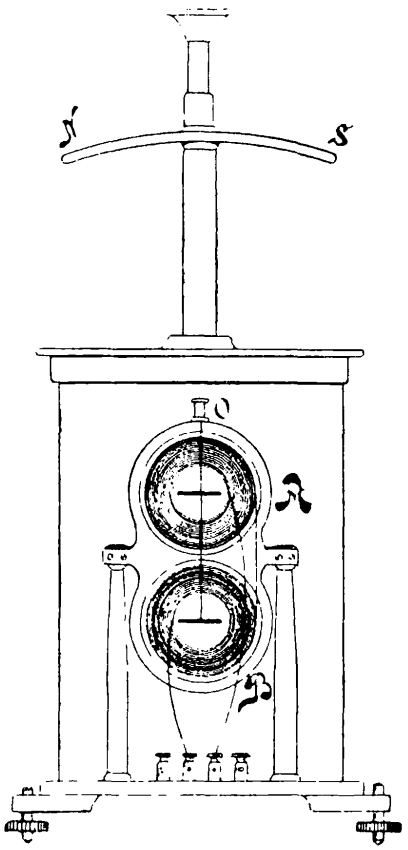


Рис. 40.

Гальваноскопы и гальванометры разсматриваемаго типа при всей своей простотѣ и легко достигаемой высокой чувствительности обладаютъ однако однимъ серьезнымъ недостаткомъ. Дѣло въ томъ, что въ этихъ приборахъ подвижная система направляется внѣшнимъ обычно весьма слабымъ магнитнымъ полемъ, которое легко можетъ претерпѣвать значительныя искаженія по силѣ или по направленію, если только вблизи того помѣщенія,

гдѣ расположенъ данный приборъ, находятся подвижные посторонніе магниты или электромагниты, динамомашины, просто проводники, по которымъ идутъ сильные токи, и т. д. Есть правда способъ борьбы съ этими внѣшними вліяніями: весь гальванометръ окружаютъ желѣзной оболочкой, которая вслѣдствіе большой магнитной проницаемости желѣза играетъ, какъ мы знаемъ (§ 14), роль магнитнаго экрана. Такъ какъ въ этомъ случаѣ сильно ослабляется и дѣйствіе земного поля, то для орієнтировки подвижной системы примѣняютъ особые неподвижные магниты. Но подобные *папцырные гальванометры* оказываются часто слишкомъ сложными и нѣжными для практики

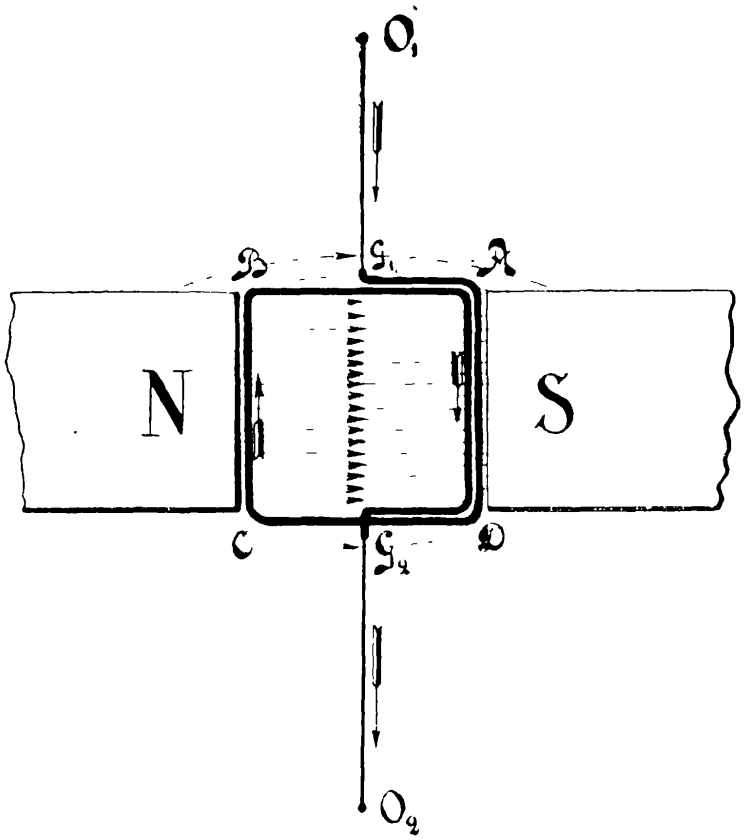


Рис. 41.

приборами и потому въ огромномъ большинствѣ случаевъ вытѣсняются въ настоящее время приборами второго типа, т. е. гальванометрами съ подвижнымъ проводникомъ и съ неподвижнымъ магнитомъ, который въ этомъ случаѣ берется настолько массивнымъ, что поле, имъ создаваемое, можетъ быть очень сильно по сравненію съ возможными внѣшними вліяніями. Такимъ образомъ, пользуясь гальванометрами второго класса, можемъ въ обычныхъ условіяхъ совершенно пренебречь этими внѣшними вліяніями, между прочимъ вліяніемъ земного магнитнаго поля, и слѣдовательно можемъ располагать эти гальванометры какъ угодно, что для практики бываетъ очень цѣнно.

Во всѣхъ гальванометрахъ съ неподвижнымъ магнитомъ и подвижнымъ проводникомъ обычно въ общихъ чертахъ сохраняется первоначальная форма, придапная этимъ гальванометрамъ Депре и Д'Арсонвалемъ, и потому они часто называются гальванометрами типа Депре-Д'Арсонваля. Устройство этого типа гальванометровъ представлено схематически на рисункѣ 41. Въ

магнитномъ полѣ между полюсами N и S постояннаго магнита или электромагнита помѣщается прямоугольная катушка $ABCD$, состоящая обыкновенно изъ большого количества витковъ тонкой изолированной проволоки. Ради простоты на рисункѣ изображенъ только одинъ полный витокъ. Обмотка катушки присоединена съ обоихъ концовъ къ весьма тонкимъ проволокамъ O_1G_1 и G_2O_2, изготовляемымъ изъ упругаго металла. Мѣста присоединенія G_1 и G_2 лежатъ на прямой, дѣлящей плоскую катушку на двѣ равныя части. Проволоки O_1G_1 и O_2G_2 служатъ прежде всего для подвѣшиванія катушки между полюсами N и S. Но кромѣ того онѣ служатъ еще для подведенія тока и, наконецъ, для того, чтобы придать катушкѣ совершенно опредѣленную оріентировку въ пространствѣ: именно, закручивая эти упругія проволоки въ мѣстахъ закрѣпленія O_1 и O_2, приводимъ плоскость катушки въ совпаденіе съ линіей, соединяющей полюса, т. е. вообще говоря въ совпаденіе съ направленіемъ главнаго магнитнаго поля. Итакъ, катушка нормально расположена такъ, какъ это показано на рисункѣ. Но если черезъ катушку пропустить токъ, то нетрудно видѣть, что она выйдетъ изъ этого нормальнаго положенія. Дѣйствительно, если токъ течетъ по направленію, указанному на рисункѣ стрѣлками, то часть AD будетъ стремиться двигаться, какъ показываетъ правило лѣвой руки, по направленію къ читателю, а часть BC—отъ читателя. Очевидно, подъ вліяніемъ возникшей пары силъ вся катушка повернется вокругъ вертикальной оси $O_1G_1G_2O_2$. И вся подвижная система установится въ новомъ положеніи, опредѣляемомъ тѣмъ условіемъ, чтобы пара электромагнитныхъ силъ уравновѣсилась равной и противоположной парой кручения подвѣсныхъ проволокъ.

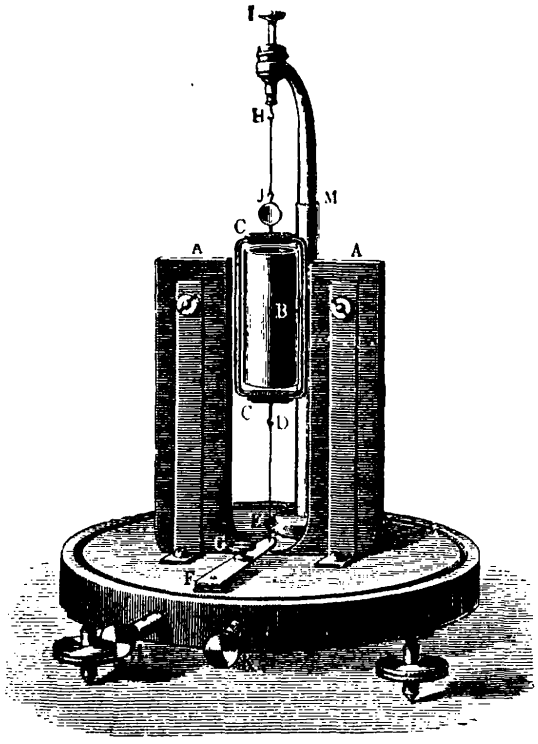


Рис. 42.

На рис. 42 представленъ внѣшній видъ гальванометра Депре-Д'Арсонваля. Назначеніе отдѣльныхъ частей прибора понятно на основаніи предыдущаго. Новымъ по сравненію со схемой является здѣсь полый цилиндръ B изъ мягкаго желѣза, рас-

положенный между полюсами магнита AA внутри катушки CC. Роль этого цилиндра заключается въ концентрированіи магнитнаго поля въ области, занимаемой катушкою. Цилиндръ не связанъ съ подвижною катушкою, а удерживается совершенно неподвижно независимымъ крѣпленіемъ.

Ясно конечно, что во всѣхъ гальванометрахъ какъ съ подвижнымъ магнитомъ, такъ и съ подвижной катушкой, направленіе отклоненія подвижной части прибора строго зависитъ отъ направленія тока. Такимъ образомъ всѣ гальваноскопы и гальванометры могутъ служить не только для обнаруженія тока и измѣренія его силы, но также и для опредѣленія направленія тока.

Что касается измѣренія угла поворота подвижной части гальванометра, то простѣйшій способъ состоитъ въ томъ, что къ

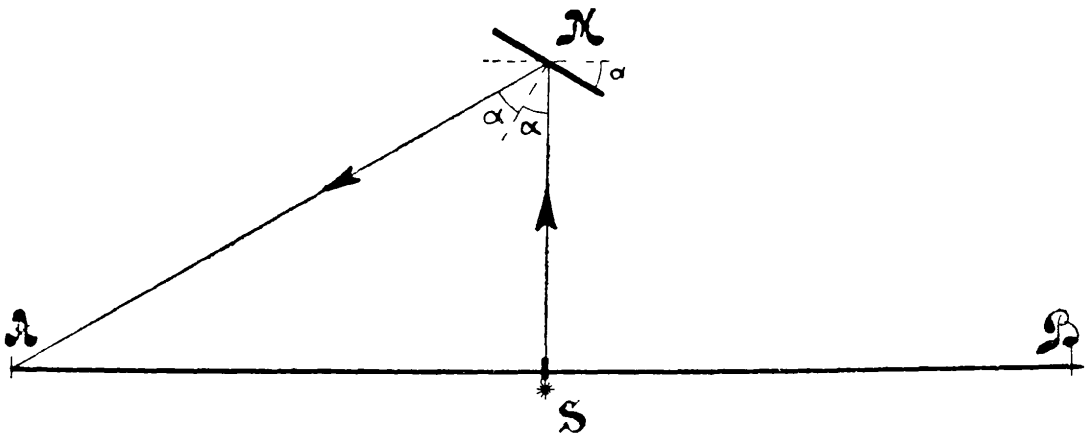


Рис. 43.

подвижной части прикрѣпляютъ стрѣлку перпендикулярно оси вращенія и располагаютъ подъ стрѣлкой шкалу съ тѣми или иными дѣленіями, въ зависимости отъ назначенія прибора. Очевидно, способъ этотъ долженъ быть тѣмъ точнѣе, чѣмъ длиннѣе стрѣлка-указатель. Но по чисто конструктивнымъ соображеніямъ нельзя дѣлать эту стрѣлку слишкомъ длинной: это сильно отягчило бы всю подвижную часть. Въ виду этого въ болѣе чувствительныхъ и точныхъ гальванометрахъ примѣняютъ другую систему, которая, въ сущности говоря, состоитъ въ замѣнѣ матеріальной, вѣсомой стрѣлки невѣсомымъ очень длиннымъ указателемъ. Роль послѣдняго играетъ свѣтовой лучъ, идущій отъ неподвижнаго источника S (рис. 43) и отражающійся затѣмъ отъ зеркальца M, связаннаго съ подвижной частью гальванометра. Лучъ этотъ затѣмъ падаетъ на шкалу AB съ дѣленіями. Положеніе на шкалѣ слѣда свѣтового луча, такъ назы-

ваемаго «зайчика», вполнѣ опредѣляетъ уголъ отклоненія гальванометра. При этомъ особо благопріятнымъ для точности отсчета является то обстоятельство, что при отклоненіи зеркальца гальванометра на уголъ α отъ первоначальнаго положенія, показаннаго на рисункѣ пунктиромъ, отраженный лучъ отклоняется на уголъ 2α, ибо уголъ отраженія равенъ углу паденія, а послѣдній какъ разъ равенъ углу поворота зеркальца. Описываемый методъ отсчета есть *объективный методъ*. Иногда онъ замѣняется *методомъ субъективнымъ*, по идеѣ тождественнымъ и заключающимся въ томъ, что вмѣсто источника свѣта располагаютъ зрительную трубу T, пользуясь которой наблюдаютъ черезъ зеркальце за дѣленіями шкалы AB (рис. 44). Очевидно, при поворачиваніи зеркальца, намъ будетъ казаться, что перемѣ-

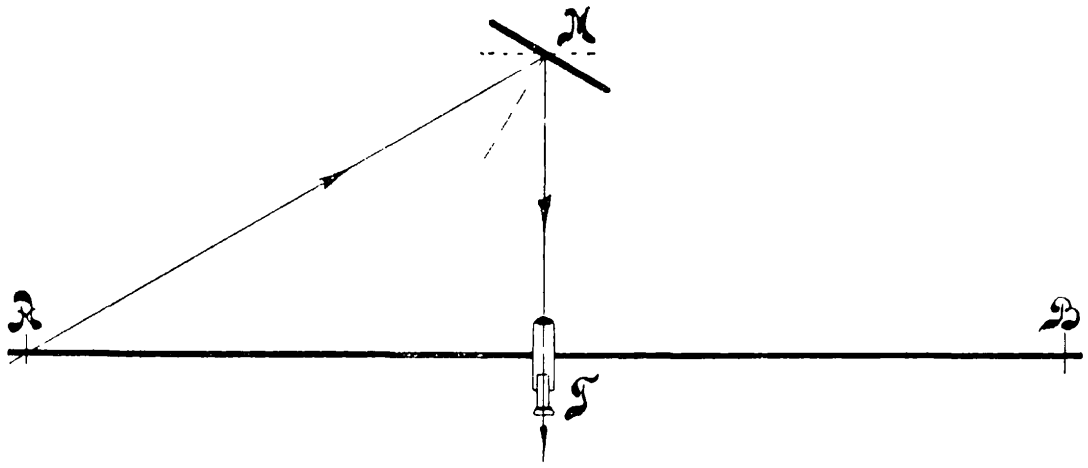


Рис. 44.

щается шкала. Для увеличенія точности отсчета въ полѣ зрѣнія трубы помѣщаютъ тонкую нить. Положеніе ея на изображеніи шкалы и опредѣляетъ собою отклоненіе гальванометра.

28. Условія возникновенія электромагнитной индукціи тока.— Пользуясь расположеніемъ опыта, описаннаго въ § 17, мы могли установить самый фактъ появленія индуктированнаго электрическаго тока, но слишкомъ далеко итти въ смыслѣ обслѣдованія явленія мы не могли по причинѣ грубости примѣненнаго въ этомъ опытѣ *способа обнаруженія тока*. Располагая чувствительнымъ гальванометромъ, мы въ состояніи нѣсколько детальнѣе обслѣдовать общія условія явленія. Итакъ обратимся еще разъ къ нашей основной схемѣ, но только вмѣсто простой магнитной стрѣлки примѣнимъ чувствительный гальванометръ G (рис. 15), включенный въ замкнутую цѣпь, прямолинейный участокъ которой AB можетъ перемѣщаться въ полѣ подковообъ-

разнаго магнита NS. При этихъ условіяхъ мы можемъ убѣдиться, что въ цѣпи возникаетъ токъ при самомъ незначительномъ передвиженіи проводника AB, лишь бы только оно сопровождалось пересѣченіемъ магнитныхъ линій проводникомъ; другими словами токъ индуктируется всегда, когда въ движеніи проводника AB есть составляющая, нормальная къ полю и къ самому проводнику. Мы можемъ убѣдиться, что токъ въ цѣпи не индуктируется вовсе, если проводникъ AB движется отъ одного полюса къ другому (вверхъ или внизъ въ данномъ случаѣ), т. е. параллельно магнитнымъ линіямъ. Токъ не индуктируется также и тогда, когда прводникъ AB движется вдоль своей оси. Въ этихъ двухъ случаяхъ проводникъ, хотя и движется въ магнитномъ полѣ, но совершенно не перерѣзываетъ магнитныхъ линій. Такимъ образомъ мы заключаемъ, что въ проводникѣ AB возникаетъ индуктированная э.-д. сила и въ замкнутой цѣпи появ-

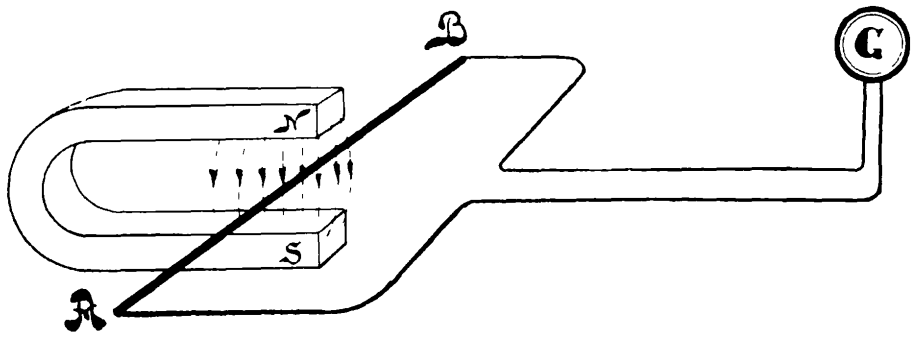


Рис. 45.

ляется токъ только въ томъ случаѣ, когда имѣетъ мѣсто перерѣзываніе магнитныхъ линій проводникомъ. Это есть единственное и достаточное условіе для возникновенія индуктированныхъ э.-д. силы и тока. И это положеніе надо считать настолько твердо установленнымъ, что если бы въ какомъ-либо случаѣ индуктировалась э.-д. сила при отсутствіи явнаго, несомнѣннаго для насъ перерѣзанія магнитныхъ линій проводникомъ, то мы должны всетаки предполагать, что таковое имѣетъ мѣсто, и изслѣдовать явленіе именно съ этой точки зрѣнія. Всегда при этомъ оказывается, что пересѣченіе магнитныхъ линій проводникомъ въ дѣйствительности происходитъ и только замаскировывается благодаря большей или меньшей сложности обстановки.

29. Законъ Ленца. Мы уже упоминали выше въ § 17, что энергія электрическаго тока, распредѣляемая въ этомъ процессѣ по различнымъ частямъ цѣпи, черпается изъ того источника,

за счетъ котораго производится движеніе въ генераторѣ тока, скажемъ въ динамомашинѣ. Но для того, чтобы внѣшній механическій двигатель могъ совершать работу, перемѣщая проводникъ въ магнитномъ полѣ, необходимо, чтобы это перемѣщеніе встрѣчало соотвѣтствующее сопротивленіе, на преодолѣваніе котораго и будетъ тратиться механическая работа. Здѣсь рѣчь идетъ не о какомъ-либо обычномъ сопротивленіи матеріальной среды, въ которой движется проводникъ. Величина такого сопротивленія не можетъ зависѣть отъ того, идетъ ли по цѣпи электрическій токъ или нѣтъ. Рѣчь идетъ сопротивленіи, которое должно отсутствовать, пока электрическаго тока нѣтъ, хотя бы движеніе проводниковъ и имѣло мѣсто, т. е. при разомкнутой цѣпи, и которое должно возникать, какъ только начнетъ проходить токъ. Но мы знаемъ, что проводникъ съ токомъ, находящійся въ магнитномъ полѣ, долженъ испытывать дѣйствіе электромагнитной силы; и это должно происходить такъ, хотя бы магнитное поле было полемъ индуктора, а токъ индуктировался этимъ самымъ полемъ. Если только электромагнитная сила будетъ надлежащимъ образомъ направлена, она, очевидно, можетъ оказывать сопротивленіе внѣшней движущей силѣ. Законъ сохраненія энергіи требуетъ, чтобы дѣло именно такъ и происходило. Это положеніе формулируется слѣдующимъ образомъ:

Направленіе индуктированнаго тока всегда таково, что возникающая электромагнитная сила стремится препятствовать тому движенію, благодаря которому индуктируется токъ.

Приведенная формулировка впервые была высказана Ленцомъ и потому носитъ названіе *закона Ленца.*

На любомъ опытѣ, на любомъ явленіи, въ которомъ мы встрѣчаемся съ электромагнитной индукціей, не трудно подтвердить и иллюстрировать законъ Ленца.

Укажемъ прежде всего на то, что его можно провѣрить, пользуясь правилами правой и лѣвой руки. Въ сущности его справедливость подтверждается самымъ фактомъ существованія двухъ особыхъ правилъ —правой и лѣвой руки,—въ извѣстномъ смыслѣ противополагаемыхъ одно другому.

Легко далѣе видѣть, что для вращенія динамомашины необходимо значительно большее усиліе, когда она развиваетъ въ цѣпи токъ, чѣмъ при разомкнутой цѣпи, т. е. при холостомъ ходѣ машины. Это проще всего обнаружить, если, напримѣръ,

мы располагаемъ динамомашиной, приводимой въ движеніе отъ руки. Вращая машину и при этомъ производя поперемѣнно замыканіе и размыканіе цѣпи, мы получаемъ весьма осязательное мускульное впечатлѣніе, свидѣтельствующее о справедливости закона Ленца. Въ опытѣ съ динамомашиной можно иллюстрировать его еще слѣдующимъ образомъ. Мы можемъ, оставляя поле индуктора неизмѣннымъ, пустить въ нее токъ отъ другого генератора и притомъ такого направленія, какое получалось, когда наша динамомашина сама развивала токъ, вращаясь, напримѣръ, по часовой стрѣлкѣ. Мы увидимъ, что динамомашина начнетъ вращаться въ обратномъ направленіи, т. е. противъ часовой стрѣлки въ данномъ случаѣ. Этотъ опытъ доказываетъ намъ еще обратимость динамомашины: она превращается въ электродвигатель, если въ нее пустить токъ отъ посторонняго генератора. И при этомъ благодаря переключеніямъ тока, выполняемымъ коллекторомъ, вращеніе электродвигателя можетъ продолжаться неопредѣленно долго. Это понятно изъ разсмотрѣнія схемъ, изображенныхъ на рис. 29 и 30.

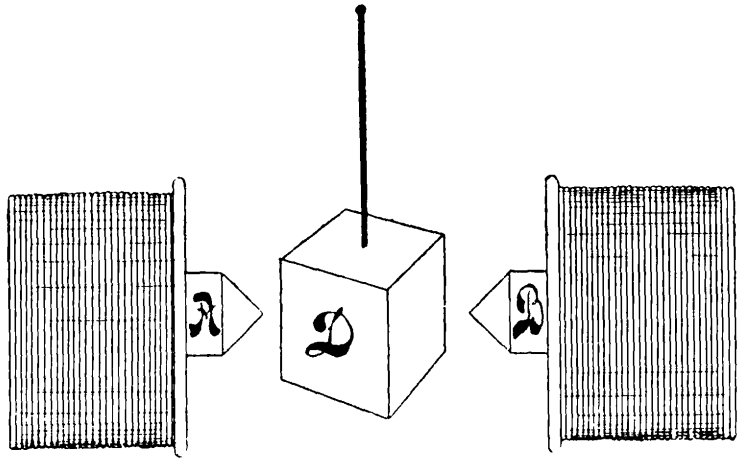


Рис. 46.

Тормозящее дѣйствіе индуктированныхъ токовъ хорошо обнаруживается, между прочимъ, въ слѣдующемъ опытѣ (рис. 46). Мѣдный дискъ или мѣдный кубикъ D подвѣшивается на нити между двумя полюсами AB электромагнита. Если предварительно закрутить подвѣсную нить и затѣмъ предоставить кубикъ самому себѣ, то онъ начинаетъ быстро вращаться. Но онъ очень быстро останавливается, какъ только возбудимъ электромагнитъ. Это происходитъ конечно отъ того, что при возбужденіи послѣдняго возникаетъ магнитное поле въ области, занятой кубикомъ, который, такимъ образомъ, вращается уже въ магнитномъ полѣ. Въ массѣ мѣди появляются индуктированные токи, такъ какъ при вращеніи кубика магнитныя линіи непрерывно рѣжутся отдѣльными элементами вещества кубика. Возникающія при этомъ электромагнитныя силы тормозятъ движеніе.

Совершенно аналогичнымъ образомъ объясняется опытъ Араго. Онъ состоитъ въ томъ, что магнитная стрѣлка NS (рис. 47), подвѣшенная надъ мѣднымъ дискомъ CC и совершенно отдѣленная отъ него стеклянной пластинкой PQ, неподвижно закрѣпленной, приходитъ во вращательное движеніе, когда приводятъ во вращеніе дискъ. И въ этомъ случаѣ наблюдаемое явленіе обусловливается токомъ, индуктируемымъ въ массѣ мѣднаго диска. Токъ же индуктируется потому, что магнитный потокъ, исходящій изъ концовъ стрѣлки NS, проходитъ отчасти и сквозь мѣдный дискъ. Слѣдовательно при вращеніи его отдѣльныя составляющія его части, въ данномъ случаѣ радіальные участки, будутъ перерѣзывать магнитный потокъ и въ нихъ появится э.-д. с., которая вызоветъ токъ, замыкающійся черезъ прочія части диска. Этотъ токъ будетъ связанъ съ магнитнымъ полемъ стрѣлки, слѣдовательно, и съ самой стрѣлкой электромагнитными взаимодѣйствіями такого характера, что будетъ тормозиться относительное движеніе диска и стрѣлки. И такъ какъ въ данномъ случаѣ, въ отличіе отъ опыта, изображеннаго на рис. 46, магнитъ не закрѣпленъ, а мѣдная масса, наоборотъ увлекается внѣшней силой, то эффектъ торможенія сводится къ тому, что сама стрѣлка увлекается дискомъ и стремится вращаться съ тою же скоростью, какъ и дискъ, такъ чтобы исчезло относительное перемѣщеніе магнитнаго потока и мѣдной массы.

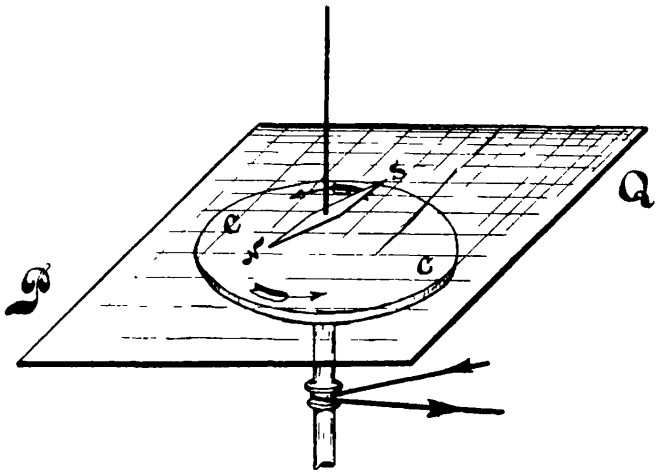


Рис. 47.

Описанное явленіе примѣняется на практикѣ, чтобы успокаивать (демфировать) качанія магнитныхъ стрѣлокъ въ буссоляхъ и гальванометрахъ. Съ этою цѣлью стѣнки и дно той камеры, въ которой помѣщается магнитная стрѣлка, дѣлаются изъ хорошо проводящаго металла, обычно изъ мѣди.

30. Токи Фуко. Въ предыдущемъ § мы познакомились съ тѣми случаями, когда электрическіе токи индуктируются въ сплошныхъ металлическихъ массахъ и замыкаются внутри ихъ, не выходя наружу. При этомъ мы обычно не имѣемъ опредѣленнаго контура проводника. Въ данномъ случаѣ проводникъ

не линейный, а вообще говоря трехъ измѣреній и токи въ массѣ такого проводника распредѣляются по путямъ наименьшаго сопротивленія.

Токи, индуктирующіеся въ сплошныхъ массахъ проводника, принято называть *токами Фуко*.

Въ нѣкоторыхъ частныхъ случаяхъ, какъ напримѣръ въ буссоляхъ и гальванометрахъ, токи Фуко оказываются полезными и потому здѣсь совершенно сознательно принимаютъ мѣры къ тому, чтобы сдѣлать ихъ эффектъ достаточнымъ. Но въ огромномъ большинствѣ случаевъ токи Фуко являются побочнымъ, вреднымъ явленіемъ, и въ этихъ случаяхъ ихъ называютъ иногда *паразитными*. Вредными оказываются эти токи потому, что на образованіе ихъ расходуется энергія, которая не находитъ себѣ полезнаго примѣненія и обычно цѣликомъ превращается въ тепло, нагрѣвая массу проводника. Съ подобными паразитными токами приходится бороться всегда. Такъ, напримѣръ, въ случаѣ динамомашины или электродвигателя типа Грамма или другой системы мы имѣемъ въ составѣ арматуры желѣзную часть въ формѣ кольца или цилиндра. Эта желѣзная часть вращается въ магнитномъ полѣ индуктора и слѣдовательно въ массѣ вращающагося желѣза могутъ возникнуть паразитные токи, совершенно ненужные для основного процесса. Для ослабленія ихъ всегда стараются подвижную металлическую часть не дѣлать сплошной, массивной, а составляютъ ее изъ отдѣльныхъ частей, обычно изъ тонкихъ пластинъ, изолированныхъ одна отъ другой. Бываютъ и такіе случаи, что токи Фуко появляются въ неподвижныхъ металлическихъ массахъ. Это, конечно, можетъ имѣть мѣсто тогда, когда такъ или иначе движется магнитный потокъ, пронизывающій эти металлическія массы. Въ подобныхъ случаяхъ, если токи оказываются паразитными, ихъ также ослабляютъ помощью подраздѣленія сплошныхъ проводниковъ на отдѣльныя составляющія части.

31. Индукція тока токомъ. До сихъ поръ мы обычно во всѣхъ случаяхъ предполагали, что магнитное поле, индуктирующее токъ, есть поле нѣкотораго постояннаго магнита. Только въ немногихъ случаяхъ мы указывали на возможность примѣненія съ этою цѣлью и электромагнита, т. е. въ сущности говоря магнитнаго поля тока. Въ дѣйствительности совершенно безразлично, какимъ образомъ создается индуктирующее поле.

Если, слѣдовательно, вблизи проводника съ токомъ помѣстить другой проводникъ, образующій часть замкнутой цѣпи, и двигать его такъ, чтобы онъ пересѣкалъ магнитныя линіи перваго проводника, то въ этомъ второмъ замкнутомъ контурѣ возникнетъ индуктированный токъ. Дадимъ нѣсколько правилъ, касающихся направленія индуктированнаго въ подобныхъ случаяхъ тока.

Положимъ, имѣемъ двѣ проводящихъ цѣпи (рис. 48). Пусть въ цѣпи A_1B_1D при замыканіи рубильника K можетъ возникать токъ указаннаго стрѣлками направленія, такъ какъ

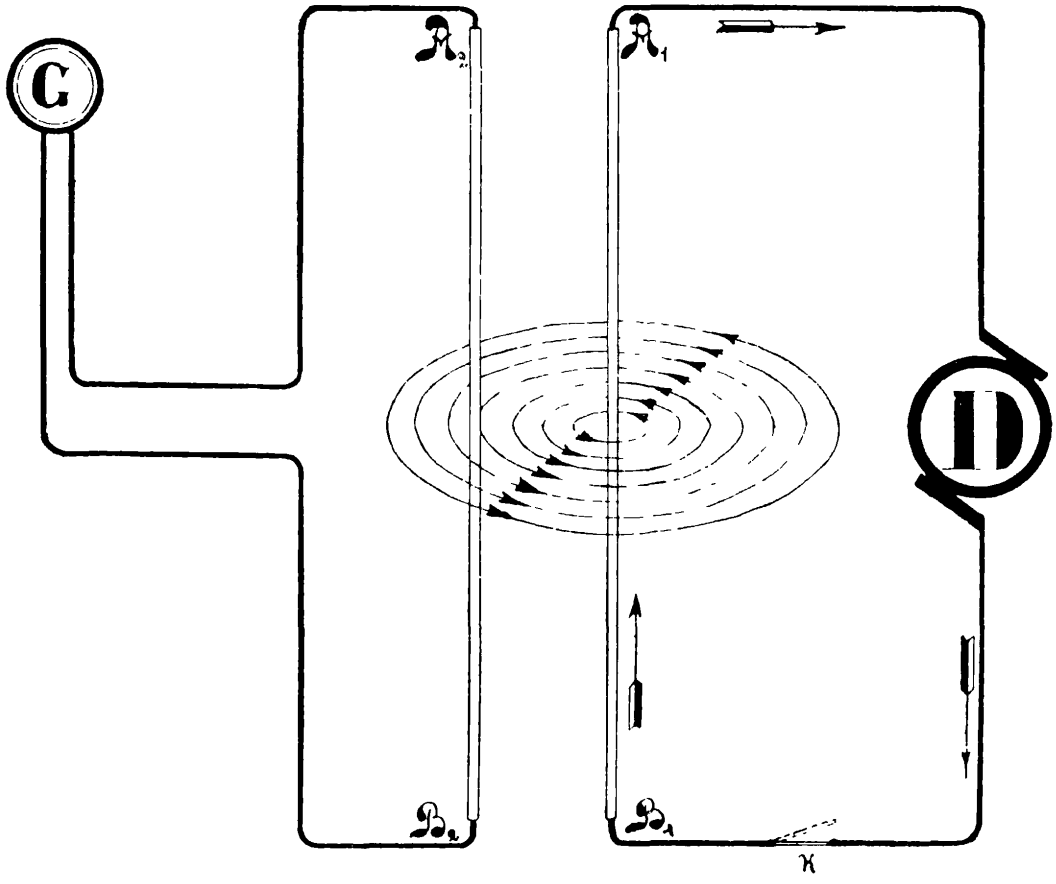


Рис. 48.

въ этой цѣпи находится вращающаяся динамомашина D. При этомъ возникаетъ магнитное поле, характеръ котораго вокругъ прямолинейнаго участка цѣпи A_1B_1 схематически показанъ на рисункѣ. Вторая замкнутая цѣпь A_2B_2G состоитъ изъ прямолинейнаго проводника A_2B_2, параллельнаго A_1B_1, и присоединеннаго къ концамъ его гальванометра G. Приблизимъ теперь A_1B_1 къ A_2B_2 въ то время, какъ токъ идетъ по первой цѣпи. При этомъ проводникъ A_2B_2 будетъ пересѣкать магнитныя линіи и, руководствуясь правиломъ правой руки, мы можемъ сказать, что въ немъ возбуждается токъ обратнаго направленія, т. е. если направленіе тока въ первой цѣпи было отъ

B_1 къ A_1, то во второй цѣпи при сближеніи проводниковъ будетъ индуктироваться токъ въ направленіи отъ A_2 къ B_2. При удаленіи проводниковъ A_1B_1 и A_2B_2 другъ отъ друга въ послѣднемъ индуктируется токъ прямой, т. е. въ направленіи отъ B_2 къ A_2, какъ это опять слѣдуетъ изъ правила правой руки. Но мы можемъ осуществить перерѣзываніе магнитныхъ линій совершенно инымъ способомъ, чѣмъ дѣлали это до сихъ поръ. Именно допустимъ, что оба проводника A_1B_1 и A_2B_2, вообще обѣ цѣпи въ цѣломъ неподвижны. Если рубильникъ K выключенъ, т. е. находится въ положеніи, показанномъ пунктиромъ, первая цѣпь будетъ разомкнута и тока въ ней не будетъ. Не будетъ и магнитнаго поля вокругъ проводника A_1B_1. Но какъ только мы замкнемъ рубильникомъ K цѣпь, долженъ возникнуть токъ, должно возникнуть и сопровождающее его магнитное поле. Однако это поле не можетъ мгновенно и разомъ появиться во всѣхъ точкахъ пространства, окружающаго проводникъ A_1B_1, являющійся въ извѣстномъ смыслѣ осью, вокругъ которой оріентируется магнитная деформація среды. Эта деформація по Фарадэю прежде всего возникаетъ у самаго проводника A_1B_1 и затѣмъ магнитныя линіи постепенно распространяются въ окружающемъ пространствѣ. При этомъ распространеніи онѣ встрѣчаютъ и перерѣзаютъ проводникъ A_2B_2. Все происходитъ такъ, какъ будто бы A_2B_2 приближается къ A_1B_1. Очевидно, что и эффектъ получится тотъ же, т. е. индуктированный токъ будетъ обратнаго направленія. Прекратимъ теперь токъ въ первой цѣпи, разомкнувъ рубильникъ K. Магнитныя линіи вокругъ A_1B_1 должны исчезнуть. Съ фарадэевской точки зрѣнія это исчезновеніе можно разсматривать, какъ обратное укорачиваніе, стягиваніе упругихъ магнитныхъ линій. На своемъ пути онѣ опять будутъ встрѣчать проводникъ A_2B_2. И токъ индуктируемый въ этомъ случаѣ будетъ прямой, т. е. въ направленіи отъ B_2 къ A_2.

Разсмотрѣнные случаи индукціи тока часто называются *индукціей тока токомъ*. На основаніи вышеизложеннаго мы можемъ составить слѣдующую таблицу правилъ для опредѣленія направленія тока, индуктированнаго токомъ:

a) при сближеніи индуктируется токъ обратный,
b) » удаленіи » прямой,
a′) » замыканіи » обратный,
b′) » размыканіи » прямой.

При выводѣ этихъ правилъ мы ради упрощенія разсматривали прямолинейные участки цѣпей A_1B_1 и A_2B_2. Въ дѣйствительности, конечно, вліяющіе другъ на друга проводники могутъ быть какой угодно формы. Очень часто имъ придаютъ форму катушекъ и въ такомъ видѣ сближаютъ другъ съ другомъ. Въ такомъ случаѣ магнитное поле первичной, индуктирующей цѣпи значительно концентрируется и потому получаемый эффектъ можетъ быть весьма замѣтнымъ. Составленныя подобнымъ образомъ цѣпи, вполнѣ аналогичныя только что изслѣдованнымъ, представлены на рис. 49. Здѣсь I и II представляютъ собою катушки, составленныя изъ большого числа витковъ изолированной проволоки. Катушки эти, играющія роль проводниковъ A_1B_1 и A_2B_2 рисунка 48, въ данномъ случаѣ имѣютъ различные діаметры, такъ что могутъ съ цѣлью болѣе тѣснаго сближенія совершенно вдвигаться одна въ другую, именно I во II.

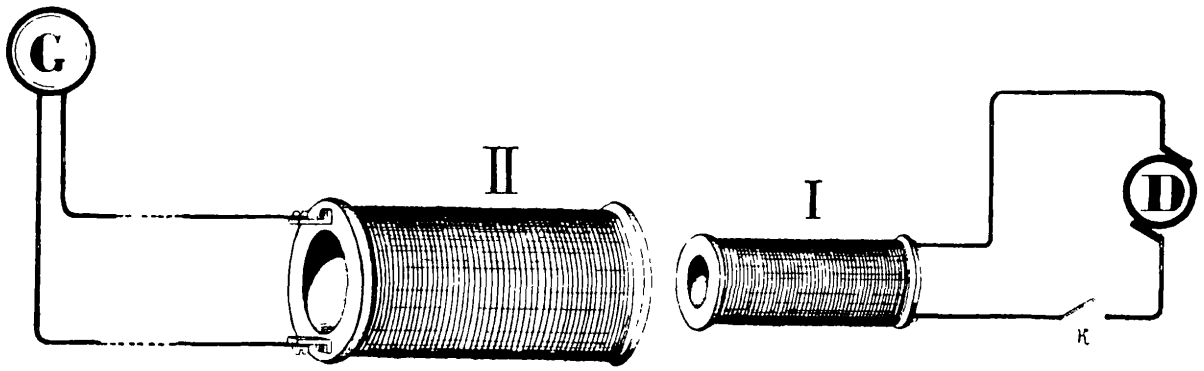


Рис. 49.

При подобной обстановкѣ опытъ съ индукціей тока при сближеніи, удаленіи, замыканіи и размыканіи вполнѣ осязательно подтверждаетъ заключенія, къ которымъ мы пришли, изслѣдуя чисто теоретически схему рисунка 48. Полезно при производствѣ этого опыта имѣть въ виду, что магнитное поле первичной катушки I имѣетъ характеръ, представленный на рис. 31. Если внутрь первичной катушки ввести желѣзный сердечникъ, то при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ эффектъ получается во много разъ большій, такъ какъ сердечникъ значительно увеличиваетъ магнитный потокъ катушки I благодаря большой магнитной проницаемости желѣза. Опытъ можно еще разнообразить слѣдующимъ образомъ. Вводимъ внутрь вторичной катушки II первичную катушку I безъ желѣзнаго сердечника и затѣмъ замкнемъ ключъ K. Во время установленія тока въ первичной цѣпи во вторичной будетъ индуктироваться токъ, который долженъ пре-

кратиться, какъ только токъ въ первичной цѣпи достигнетъ своей окончательной силы и сдѣлается постояннымъ, ибо тогда магнитное поле первичнаго тока сдѣлается неизмѣннымъ. По прекращеніи тока во вторичной цѣпи возьмемъ желѣзный сердечникъ и введемъ его внутрь катушекъ I и II. Мы такимъ образомъ создадимъ условія для увеличенія магнитнаго потока, пронизывающаго катушки, или, какъ говорятъ, сцѣпляющагося съ витками катушекъ. Магнитный потокъ и увеличится; въ составъ его войдутъ новыя добавочныя линіи, возникновеніе которыхъ мы должны себѣ представлять такъ же, какъ и возникновеніе основного потока при замыканіи тока. Слѣдовательно должны имѣть мѣсто новыя пересѣченія витковъ вторичной катушки магнитными линіями, и потому во время введенія внутрь катушекъ желѣзнаго сердечника во вторичной цѣпи опять будетъ индуктироваться токъ и при томъ такого же направленія, какъ и при замыканіи первичнаго тока. При выдвиганіи желѣзнаго сердечника получимъ, конечно, обратное явленіе.

32. Обобщеніе закона Ленца.—Случай индукціи э.-д. силы и тока во вторичной цѣпи, при замыканіи тока въ первичной, разобранный въ предыдущемъ §, не сопровождается передвиженіемъ проводника или вообще какой бы то ни было матеріальной части системы и потому не подчиняется закону Ленца въ той формулировкѣ, которая была приведена въ § 29. Можно однако понять законъ Ленца нѣсколько общиѣе и вмѣсто того, чтобы говорить о частномъ случаѣ механической реакціи, проявляющейся при индукціи тока во время движенія проводника во внѣшнемъ магнитномъ полѣ, можно высказать слѣдующее болѣе общее положеніе:

Направленіе индуктированной э.-д. силы всегда бываетъ таково, что дѣйствіе ея стремится ослабить измѣненія въ системѣ, благодаря которымъ э.-д. сила индуктируется.

Если э.-д. сила индуктируется благодаря передвиженію проводника въ магнитномъ полѣ, то возникающая электромагнитная сила стремится воспрепятствовать этому движенію.

Если э.-д. сила индуктируется въ нѣкоторой неподвижной цѣпи благодаря тому, что въ сосѣдней тоже неподвижной цѣпи замыкается электрическій токъ и создается связанное съ нимъ магнитное поле, то эта э.-д. сила будетъ обратнаго направленія и вызванный ею токъ своимъ магнитнымъ дѣйствіемъ стремится ослабить индуктирующее поле. Иное получается при размы-

каніи въ цѣпи тока, т. е. при исчезновеніи связаннаго съ нимъ поля. Въ сосѣдней цѣпи индуктируется токъ прямой, токъ того же направленія и слѣдовательно этотъ токъ своимъ магнитнымъ дѣйствіемъ въ настоящемъ случаѣ будетъ стремиться поддержать, усилить исчезающее основное поле.

Въ дальнѣйшемъ мы еще встрѣтимся съ нѣкоторыми другими случаями электромагнитной индукціи, которые также хорошо укладываются въ рамки обобщеннаго закона Ленца.

Законъ этотъ представляетъ собою, по существу, не что иное, какъ законъ инерціи въ электромагнитныхъ системахъ. Онъ гласитъ, что всякая электромагнитная система стремится сохранить свое состояніе и при всякой попыткѣ измѣнить это состояніе въ системѣ возникаютъ силы противодѣйствія механическаго или электромагнитнаго характера.

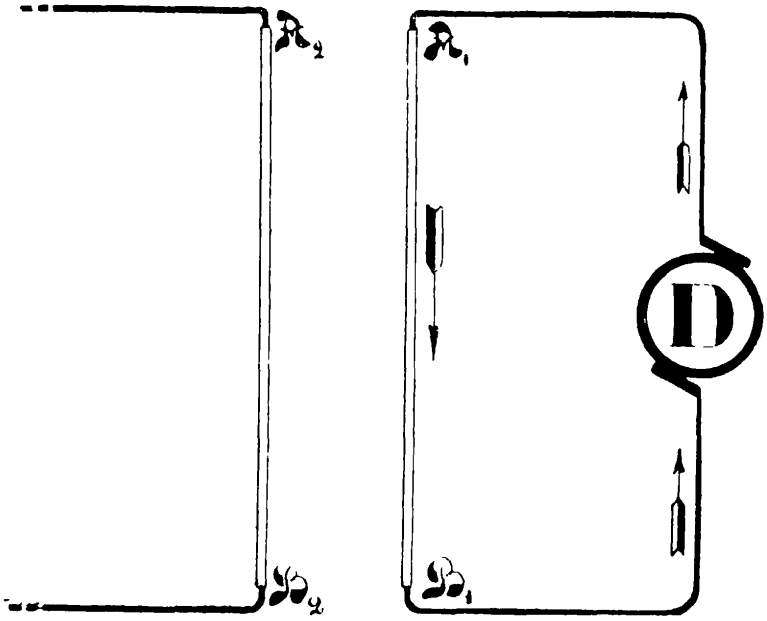


Рис. 50.

33. Механическія взаимодѣйствія токовъ. — Какъ мы знаемъ, электромагнитная сила, приложенная къ проводнику съ токомъ, возникаетъ всякій разъ, когда этотъ проводникъ подвергается воздѣйствію внѣшняго магнитнаго поля. Послѣднее можетъ быть полемъ нѣкотораго другого тока. Въ свою очередь и этотъ второй токъ, находясь въ магнитномъ полѣ перваго, будетъ испытывать на себѣ дѣйствіе соотвѣтствующей электромагнитной силы. Такимъ образомъ оказывается, что два проводника, по которымъ протекаютъ токи, механически взаимодѣйствуютъ, находясь одинъ вблизи другого. Направленіе и характеръ этого взаимодѣйствія можно установить, пользуясь правилами штопора и лѣвой руки. Мы попытаемся достигнуть того же, исходя изъ закона Ленца. Допустимъ, что мы оперируемъ съ двумя проводниками A_1B_1 и A_2B_2, входящими въ составъ двухъ замкнутыхъ цѣпей (рис. 50). По проводнику A_1B_1 течетъ токъ указаннаго стрѣлками направленія. Если мы теперь будемъ удалять A_2B_2 отъ A_1B_1, то въ проводникѣ A_2B_2 будетъ индуктироваться токъ прямой, т. е.

того же направленія, что и въ A_1B_1. Возникающія при этомъ электромагнитныя силы должны противодѣйствовать удаленію проводниковъ другъ отъ друга. Слѣдовательно, *токи, одинаково направленные, взаимно притягиваются* (рис. 51). Если теперь мы будемъ проводникъ A_2B_2 (рис. 50) приближать къ A_1B_1, то въ A_2B_2 будетъ индуктироваться токъ обратнаго направленія, т. е. отъ B_2 къ A_2. Электромагнитныя же силы, возникающія при этомъ, должны противодѣйствовать сближенію проводниковъ. Слѣдовательно, токи, *направленные въ противоположныя стороны, взаимно отталкиваются* (рис. 52).

Законы механическаго взаимодѣйствія токовъ можно установить еще между прочимъ, исходя изъ картины результи-

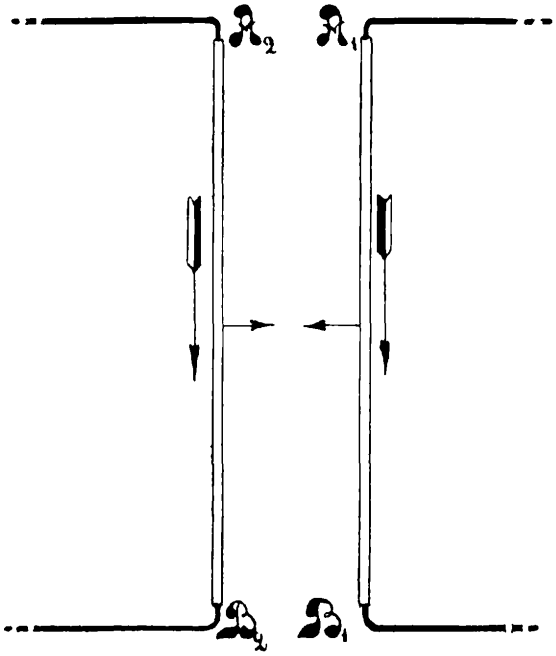


Рис. 51.

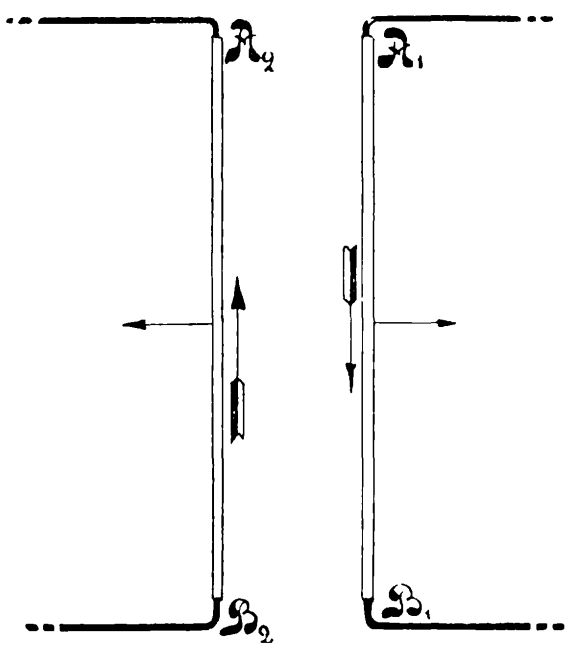


Рис. 52.

рующаго магнитнаго поля, которое получается при сближеніи двухъ проводниковъ съ токами. Остановимся прежде всего на случаѣ токовъ одного направленія. Допустимъ, что плоскость рисунка 53 перпендикулярна проводникамъ. Мы, слѣдовательно, имѣемъ здѣсь сѣченія двухъ проводниковъ. Пусть въ обоихъ токъ идетъ отъ насъ. Каждый изъ проводниковъ вноситъ въ общее магнитное поле свою систему магнитныхъ линій, представленныхъ на рисункѣ пунктиромъ. Но эти двѣ системы не могутъ существовать независимо: онѣ сливаются въ одну общую. При этомъ надо имѣть въ виду, что магнитныя линіи, принадлежащія каждому изъ токовъ, въ промежуткѣ между проводниками направлены въ противоположныя стороны, а внѣ промежутка въ одну и ту же сторону. Слѣдовательно надо ждать,

что въ результирующемъ полѣ магнитныя линіи будутъ сравнительно разрѣжены между проводами и сгущены по сторонамъ, ибо въ одномъ случаѣ магнитныя деформаціи будутъ вычитаться, а въ другомъ—складываться. Схема результирующаго поля представлена на рис. 54. Эту схему можно получить опыт-

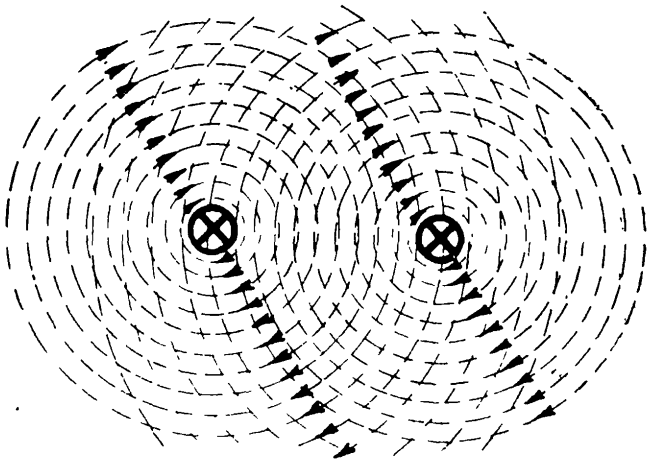


Рис. 53.

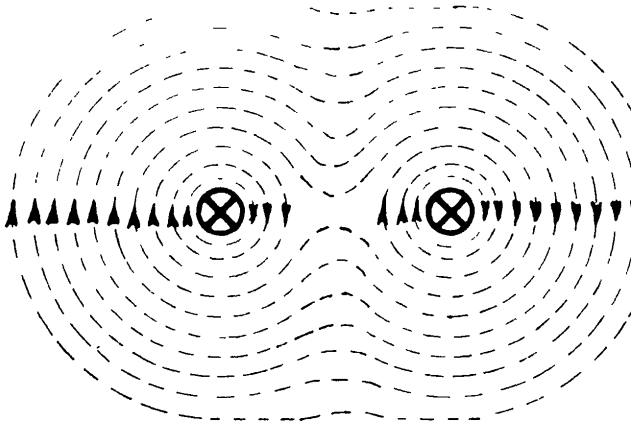


Рис. 54.

нымъ путемъ, пользуясь методомъ желѣзныхъ опилковъ. Если при этомъ вспомнить, что магнитныя линіи ведутъ себя, какъ упругія нити, стремясь укоротиться, и что въ ихъ системѣ наблюдается боковой распоръ, то ясно, что подъ вліяніемъ магнитныхъ линій, охватывающихъ оба проводника, эти послѣдніе должны сближаться.

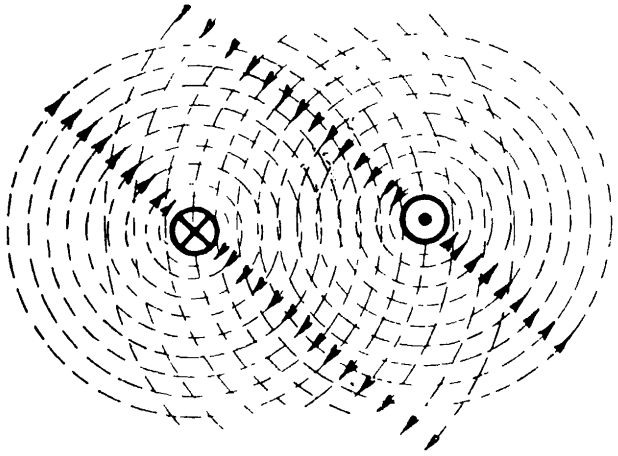


Рис. 55.

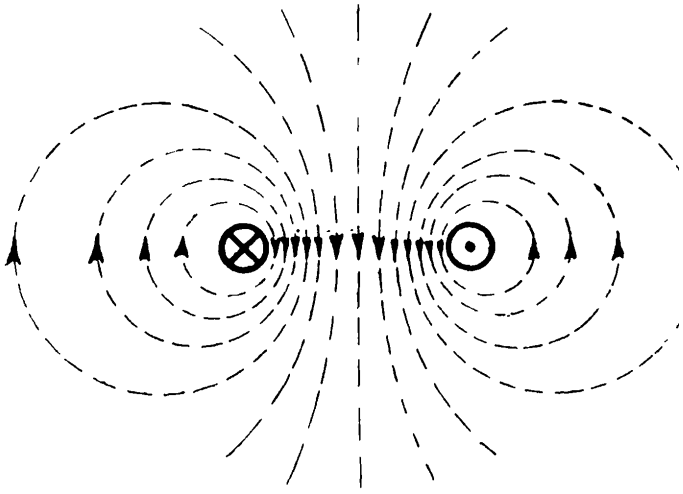


Рис. 56.

Если токи направлены въ разныя стороны, то получаемъ картину отдѣльныхъ системъ магнитныхъ линій, представленную на рис. 55. Мы видимъ, что въ этомъ случаѣ магнитныя линіи обѣихъ системъ направлены въ одну и ту же сторону въ промежуткѣ между проводами, а внѣ этого промежутка—направлены въ противоположныя стороны. Слѣдовательно въ результирую-

щемъ полѣ магнитныя деформаціи будутъ складываться между проводами и вычитаться одна изъ другой во внѣшней части поля. Другими словами, магнитныя линіи должны сгуститься внутри и разрѣдиться снаружи, какъ это представлено на рисункѣ 56. Ясно конечно, что при этихъ условіяхъ боковой распоръ будетъ сильнѣе въ группѣ магнитныхъ линій между проводами, чѣмъ во внѣшней части поля, и потому въ результатѣ возьмутъ перевѣсъ силы, стремящіяся отодвинуть проводники одинъ отъ другого.

Силы взаимодѣйствія токовъ, только что разобранныя, проявляются рѣшительно всегда, когда имѣются два проводника съ токами одинъ вблизи другого, при чемъ эти проводники могутъ даже входить въ составъ одной и той же цѣпи. Въ видѣ примѣра опишемъ одинъ изъ опытовъ Элигю Томсона, въ которомъ эти силы проявляются въ особенно рѣзкой формѣ. Берутъ катушку A, по которой пропускаютъ сильный токъ, непрерывно мѣняющій свое направленіе, т. е. перемѣнный токъ, и вставляютъ въ нее желѣзный сердечникъ F (рис. 57). Такъ какъ этотъ сердечникъ подвергается непрерывному дѣйствію измѣняющагося магнитнаго потока, то во избѣжаніе токовъ Фуко его обыкновенно составляютъ изъ отдѣльныхъ желѣзныхъ проволокъ. Сердечникъ F дѣлается настолько длиннымъ, что большая часть его остается внѣ катушки, направляясь кверху. На сердечникъ надѣваютъ массивное мѣдное кольцо k, которое ложится отъ дѣйствія силы тяжести на верхнюю часть катушки, пока перемѣнный токъ не пущенъ. Но какъ только замыкаемъ цѣпь перемѣннаго тока, кольцо k тотчасъ же съ силой подбрасывается кверху и обычно совершенно сходитъ съ сердечника F. Объясняется это тѣмъ, что въ кольцѣ k индуктируется, вообще говоря, токъ направленія обратнаго по сравненію съ катушкою. Это можно показать, хотя бы основываясь на обобщенномъ законѣ Ленца. Дѣйствительно, благодаря вліянію перемѣннаго тока, текущаго по

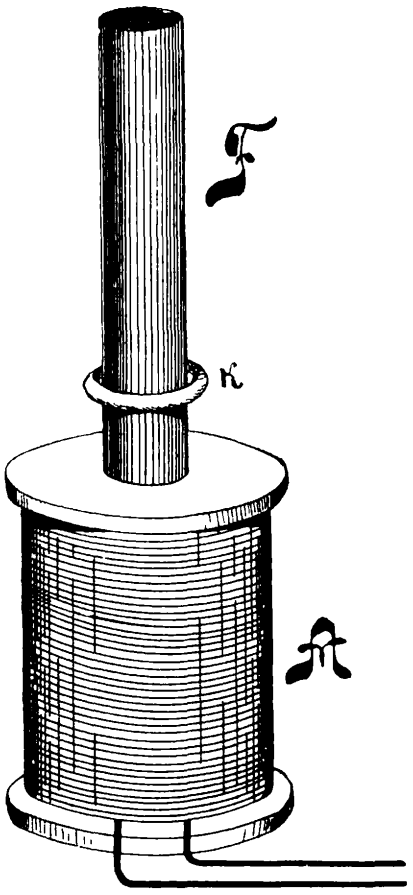


Рис. 57.

катушкѣ A, сквозь кольцо k начинаетъ проходить нѣкоторый магнитный потокъ. Для того, чтобы воспрепятствовать или по крайней мѣрѣ оказывать противодѣйствіе этому, въ кольцѣ k долженъ появляться токъ обратнаго направленія, которое однако должно непрерывно мѣняться синхронно съ магнитнымъ потокомъ, и, слѣдовательно, съ токомъ въ катушкѣ A. Итакъ, въ данномъ случаѣ мы имѣемъ дѣло съ отталкиваніемъ противоположно направленныхъ токовъ въ катушкѣ A и въ кольцѣ k. Авторъ описываемаго опыта, Элигю Томсонъ, сконструировалъ особые электродвигатели перемѣннаго тока, въ которыхъ использовано какъ разъ описываемое отталкивательное дѣйствіе. Электродвигатели этого типа начинаютъ входить въ настоящее время въ употребленіе подъ именемъ *репульсіонныхъ*.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

Сила тока.

34. Связь между электромагнитной силой и силой тока. — Изъ всего сказаннаго въ §§ 19 и 26 о силѣ тока и электромагнитной силѣ, ясно, что при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ электромагнитная сила должна быть прямо-пропорціональна силѣ тока. Дѣйствительно, выше было указано, что силу магнитнаго поля тока въ любой точкѣ мы должны считать прямо-пропорціональной силѣ тока. Слѣдовательно мы можемъ написать для нѣкоторой точки поля:

$$H' = k_1 i,$$

гдѣ H' есть сила магнитнаго поля тока, i — сила тока, а k_1 — коэффиціентъ, зависящій отъ геометрическихъ условій и отъ выбора единицъ.

Сила же, съ которою это поле дѣйствуетъ на магнитную массу m, выразится такъ (§ 4):

$$f = mH' = mk_1 i.$$

Но мы знаемъ, что эта сила должна быть равна по абсолютной величинѣ электромагнитной силѣ, съ которою магнитный полюсъ, иными словами, поле, съ нимъ связанное, дѣйствуетъ на проводникъ съ токомъ. Такимъ образомъ, электромагнитная сила можетъ быть выражена тѣмъ же соотношеніемъ:

$$f = mk_1 i,$$

т. е. она прямо-пропорціональна силѣ тока.

Въ это выраженіе входитъ величина магнитной массы m. Такъ какъ электромагнитную силу мы разсматриваемъ съ точки зрѣнія взаимодѣйствія тока съ внѣшнимъ магнитнымъ полемъ, то удобнѣе ввести въ полученное выраженіе вмѣсто массы m силу связаннаго съ нею магнитнаго поля. Съ этою цѣлью разсмотримъ ради упрощенія вывода такой случай, когда на всемъ протяженіи проводника внѣшнее поле имѣетъ одну и ту же силу и направленіе его нормально къ проводнику. Послѣднее обстоятельство, какъ мы знаемъ, обусловливаетъ наибольшее возможное значеніе электромагнитной силы при данныхъ условіяхъ. Такой случай представленъ на рис. 58. Здѣсь мы имѣемъ два сѣченія проводника, имѣющаго кольцевую форму, діаметральной плоскостью, перпендикулярной плоскости кольца. Радіусъ окружности контура цѣпи есть a, m—магнитная масса, положимъ сѣверная, расположенная въ центрѣ кольца. Пунктиромъ изображены магнитныя линіи, исходящія изъ массы m. Силы взаимодѣйствія представлены соотвѣтствующими стрѣлками. Такъ какъ каждый элементъ проводника находится на одномъ и томъ же разстояніи a отъ магнитной массы, то сила внѣшняго поля для любой точки проводника выразится такъ:

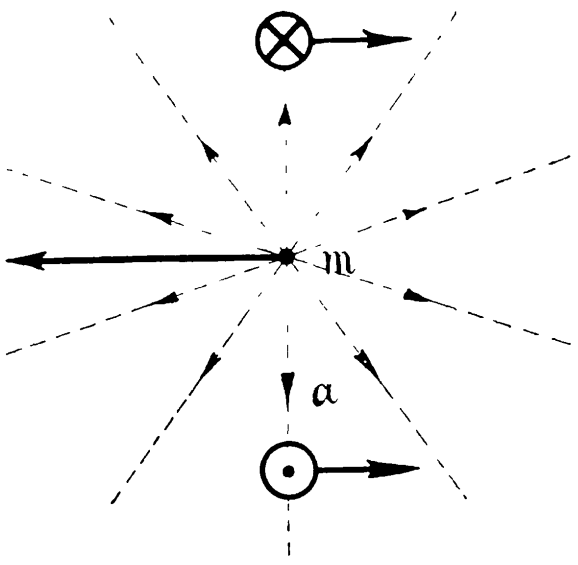


Рис. 58.

$$H = \frac{m}{a^2}.$$

Отсюда имѣемъ:

$$m = a^2 H.$$

Подставляя это въ данное выше соотношеніе для электромагнитной силы, получаемъ:

$$f = a^2 H k_1 i = k_1 a^2 H i.$$

Такова величина полной электромагнитной силы, приложенной ко всему проводнику. Очевидно, она есть равнодѣйствующая всѣхъ параллельныхъ въ данномъ случаѣ силъ, приложенныхъ къ каждому отдѣльному элементу проводника. Такъ

какъ условія совершенно тождественны для всего протяженія проводника, то, обозначая длину его черезъ l, можемъ слѣдующимъ образомъ выразить электромагнитную силу, приложенную къ единицѣ длины проводника:

$$f_1 = \frac{k_1 a^2}{l} \cdot Hi = k_2 Hi,$$

гдѣ k_2 будетъ нѣкоторой постоянной.

Обратно можемъ для полной электромагнитной силы, приложенной къ проводнику длиною въ l, написать:

$$f = f_1 \cdot l = k_2 Hil.$$

Такимъ образомъ теперь мы совершенно отвлекаемся отъ какихъ бы то ни было магнитныхъ массъ, оперируя съ величиною электромагнитной силы.

Итакъ соотношеніе:

$$f = k_2 Hil$$

справедливо для того случая, когда проводникъ расположенъ нормально къ внѣшнему магнитному полю, сила котораго для всѣхъ точекъ проводника одна и та же. Слѣдовательно оно должно быть справедливо и для случая, который является простѣйшимъ въ геометрическомъ отношеніи, именно для прямолинейнаго проводника AB, расположеннаго въ однородномъ магнитномъ полѣ перпендикулярно магнитнымъ линіямъ (рис. 59). Если для подобныхъ условій мы положимъ:

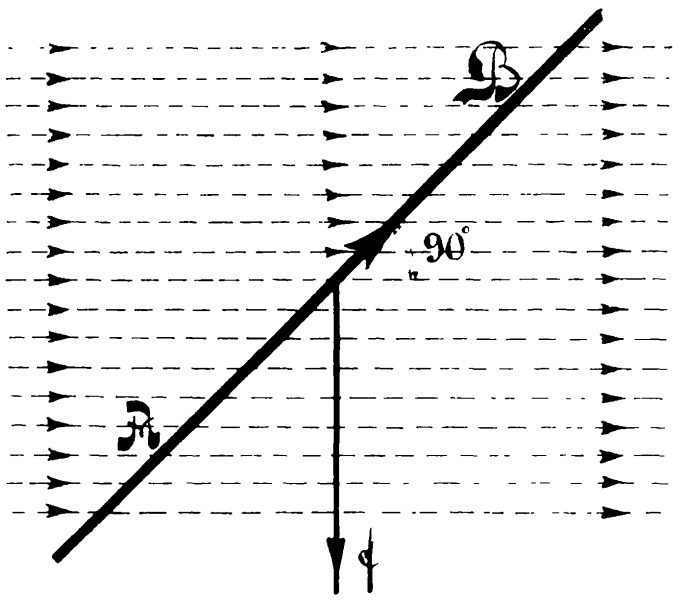


Рис. 59.

$$k_2 = 1,$$

связавъ себя при этомъ въ отношеніи выбора единицъ, то для участка проводника AB, длина котораго есть l, имѣемъ:

$$f = Hil$$

и для единицы длины проводника:

$$f_1 = Hi.$$

Оперируя со всѣми вышеприведенными выраженіями для величины электромагнитной силы, необходимо имѣть въ виду, что всѣ они выведены лишь для случая магнитнаго поля въ воздухѣ или пустотѣ, когда:

$$\mu = 1$$

и численно:

$$B = H.$$

Дѣло въ томъ, что во всѣхъ разобранныхъ случаяхъ мы имѣли дѣло съ воздѣйствіемъ магнитной деформаціи на проводникъ съ токомъ. Во всѣхъ случаяхъ, слѣдовательно, силы взаимодѣйствія обусловливаются густотою магнитныхъ линій поля, другими словами величиною магнитной индукціи B. Поэтому, если при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ мы замѣнимъ среду съ магнитной проницаемостью равной единицѣ другою средою, для которой:

$$\mu > 1,$$

то электромагнитная сила должна возрасти въ μ разъ, т. е.

$$f = \mu . Hil = Bil.$$

Сила же, приложенная къ единицѣ длины проводника, выразится въ самомъ общемъ случаѣ такъ:

$$f_1 = Bi.$$

По существу такое же выраженіе слѣдуетъ писать и для случая магнитнаго поля въ воздухѣ или пустотѣ. Если же мы въ этомъ случаѣ вмѣсто B и пишемъ часто H, то надо при этомъ еще подразумѣвать множитель:

$$\mu = 1.$$

35. Единицы силы тока.—Какъ мы указали уже въ предыдущемъ §, отсутствіе коэффиціента пропорціональности въ выраженіи для электромагнитной силы связываетъ насъ въ выборѣ единицъ, которыми измѣряются входящія въ это выраженіе величины. Будемъ исходить изъ общаго выраженія:

$$f = Bil.$$

Въ него входятъ четыре величины: механическая сила, магнитная индукція, сила тока и длина проводника. Для любыхъ трехъ изъ этихъ величинъ мы можемъ еще взять произвольныя единицы. Остающаяся же четвертая можетъ быть выражена

только въ совершенно опредѣленныхъ единицахъ, обусловливаемыхъ первыми тремя. Она является производною отъ первыхъ трехъ. Въ настоящемъ случаѣ мы уже имѣемъ единицы—абсолютныя единицы—для измѣренія трехъ входящихъ въ соотношеніе величинъ. Именно, въ абсолютной системѣ единицъ механическая сила выражается въ динахъ, магнитная индукція—въ гауссахъ, длина—въ сантиметрахъ. Слѣдовательно, въ этой же системѣ единица силы тока будетъ производною единицею отъ дины, гаусса и сантиметра.

Полагая:

$$f = 1 \text{ динѣ},$$
$$B = 1 \text{ гауссу},$$
$$l = 1 \text{ сантиметру},$$

получаемъ:

$$i = 1.$$

Такимъ образомъ, *за единицу силы тока принимаютъ силу такого тока, при которомъ къ каждому сантиметру проводника, помѣщеннаго въ однородное магнитное поле въ одинъ гауссъ нормально къ его направленію, приложена электромагнитная сила въ одну дину.*

Эту единицу называютъ *абсолютной электромагнитной единицей силы тока.*

На практикѣ оказывается, что эта единица силы тока слишкомъ велика и потому нѣсколько неудобна. Въ виду этого обычно пользуются единицей въ десять разъ меньшей, и эту новую единицу—*практическую электромагнитную единицу силы тока*—называютъ *амперомъ.*

Между амперомъ и абсолютной электромагнитной единицей силы тока существуетъ, слѣдовательно, такое соотношеніе:

$$1 \text{ амперъ} = 10^{-1} \text{ абс. эл.-магн. ед.}$$

36. Измѣреніе силы тока. Амперметры.—Для измѣренія силы тока, вообще говоря, можно пользоваться любой комбинаціей, лишь бы только она удовлетворяла тому условію, чтобы каждому значенію силы тока соотвѣтствовало нѣкоторое совершенно опредѣленное измѣненіе въ системѣ. Этому условію между прочимъ удовлетворяютъ описанные въ § 27 гальванометры. Любой изъ нихъ можетъ служить для измѣренія силы тока, если имѣется въ немъ приспособленіе для опредѣленія угла

отклоненія. Дѣйствительно, мы видѣли, что уголъ отклоненія гальванометра зависитъ отъ соотношенія между силами, направляющими подвижную часть системы, и электромагнитными силами, стремящимися вывести эту часть изъ нормальнаго положенія. Каждому значенію электромагнитныхъ силъ, т. е. каждому значенію силы тока, соотвѣтствуетъ, слѣдовательно, нѣкоторое совершенно опредѣленное отклоненіе. И если мы при помощи предварительной операціи, называемой *градуированіемъ*, устано-

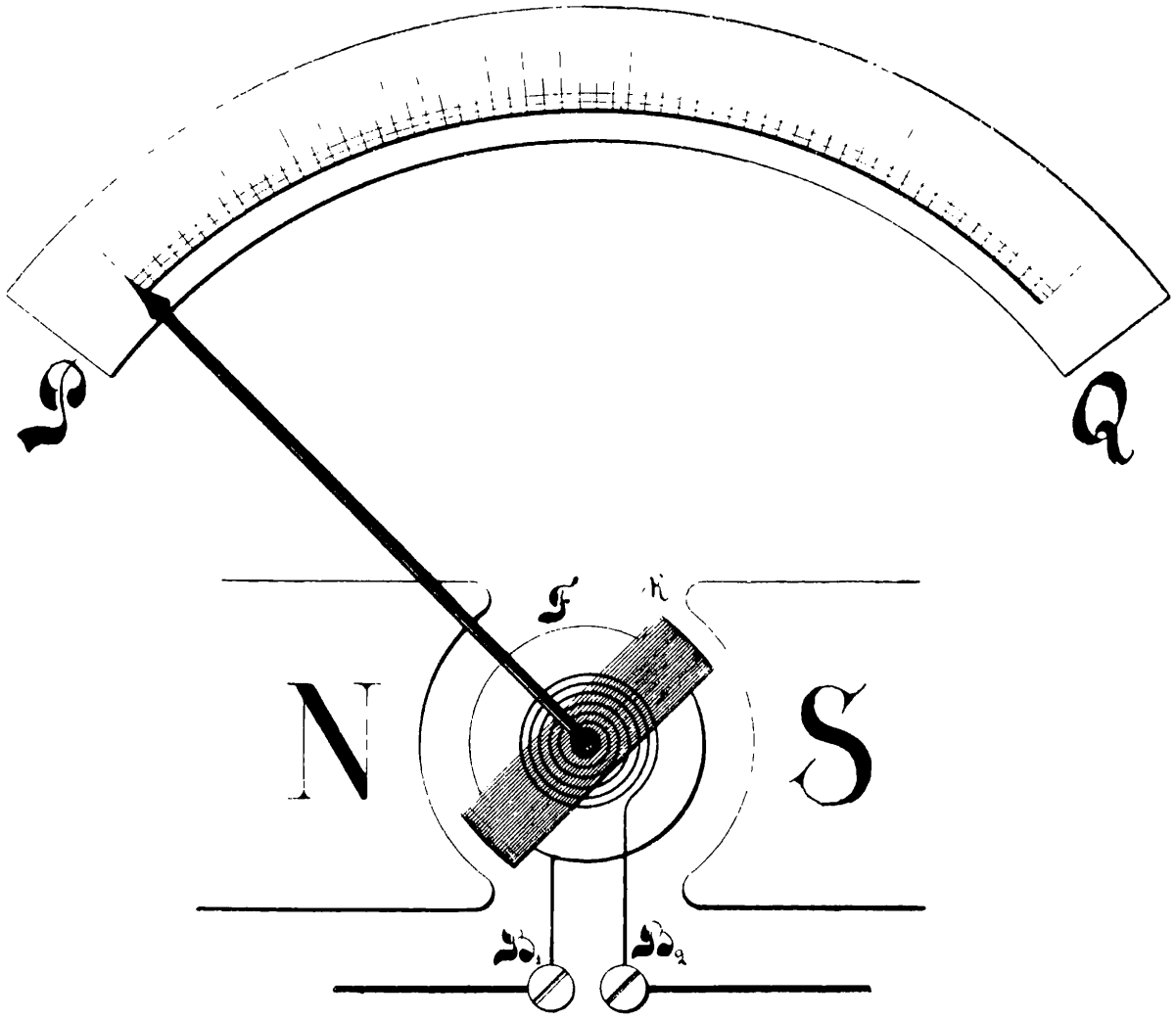


Рис. 60.

вимъ связь между силой тока и угломъ отклоненія, то мы имѣемъ такимъ образомъ приборъ для измѣренія силы тока, такъ называемый *амперметръ*.

Въ виду тѣхъ недостатковъ, которыми обладаютъ гальванометры съ подвижнымъ магнитомъ и о которыхъ мы говорили при описаніи этихъ гальванометровъ, въ настоящее время всѣ технические амперметры, если только они конструируются по типу гальванометровъ, представляютъ собою обыкновенно въ той или другой формѣ гальванометръ Депре-Д'Арсонваля. Въ

видѣ примѣра на рис. 60 представленъ подобный амперметръ. Плоскость чертежа перпендикулярна оси подвижной катушки K, расположенной между полюсами стальнаго магнита N и S. Поверхностямъ этихъ полюсовъ обычно придаютъ цилиндрическую форму. Внутри катушки находится желѣзный цилиндръ F,. роль котораго состоитъ въ концентраціи магнитныхъ линій Кромѣ того въ связи съ цилиндрической формой полюсныхъ наконечниковъ этотъ цилиндръ обусловливаетъ радіальное направленіе поля въ междужелѣзномъ пространствѣ, въ которомъ движется катушка K. Эта послѣдняя состоитъ обычно изъ большого числа витковъ сравнительно тонкой изолированной проволоки и удерживается въ пространствѣ при посредствѣ оси, концы которой опираются на подшипники. Катушка включается въ цѣпь при посредствѣ двухъ бронзовыхъ спиралей, одна изъ которыхъ располагается иногда спереди (видна на рисункѣ), а другая сзади. Эти же спирали служатъ для оріентированія катушки въ нѣкоторомъ нормальномъ положеніи, такъ какъ онѣ закрѣплены съ одной стороны. Сверхъ того силою своего кручепія онѣ ограничиваютъ уголъ отклоненія катушки K при пропусканіи черезъ приборъ тока. Ясно, что, чѣмъ сильнѣе будетъ токъ, тѣмъ больше будетъ уголъ отклоненія. Каждому углу поворота соотвѣтствуетъ опредѣленное положеніе на шкалѣ PQ стрѣлки, связанной съ осью катушки. На шкалѣ обыкновенно бываютъ прямо написаны значенія дѣленій. B_1, B_2—зажимы прибора.

Приборъ этотъ въ томъ видѣ, какъ мы его описали, не можетъ служить для измѣренія очень сильныхъ токовъ. Не говоря уже о томъ, что слишкомъ сильный токъ можетъ разрушить приборъ вслѣдствіе выдѣленія тепла въ проводникѣ при прохожденіи черезъ него тока, чувствительность такого прибора очень велика; полное отклоненіе во всю шкалу достигается при сравнительно слабомъ токѣ. Въ виду этого описанное выше устройство амперметра приходится нѣсколько дополнить въ случаѣ необходимости предназначить приборъ для измѣренія сильныхъ токовъ. Именно устраиваютъ такъ, чтобы черезъ приборъ проходила только болѣе или менѣе незначительная часть полнаго тока. Этого достигаютъ, включая между зажимами прибора B_1 и B_2 (рис. 61) отвѣтвленіе или такъ называемый *шунтъ*, состоящій изъ проводника съ небольшимъ электрическимъ сопротивленіемъ. Токъ, дойдя до точки B_1, развѣтвляется и зна-

чительная часть его проходитъ черезъ шунтъ въ виду его сравнительно малаго сопротивленія, а меньшая часть тока проходитъ черезъ самый приборъ A и вызываетъ то или иное отклоненіе стрѣлки. При такихъ условіяхъ по главной цѣпи можетъ проходить сколь угодно сильный токъ. Всегда можно подобрать такой шунтъ, чтобы лишь нѣкоторая опредѣленная часть тока, напримѣръ, 0,01 или 0,001, проходила черезъ подвижную катушку амперметра. Ясно, что при этой новой комбинаціи съ шунтомъ мы должны соотвѣтственно переградуировать шкалу прибора. Что касается, расположенія шунта, то въ случаѣ незначительныхъ размѣровъ онъ помѣщается внутри амперметра, составляя съ нимъ одно цѣлое въ конструктивномъ отношеніи. Если же размѣры шунта велики, то онъ располагается отдѣльно и соединяется съ приборомъ спеціальными проводами.

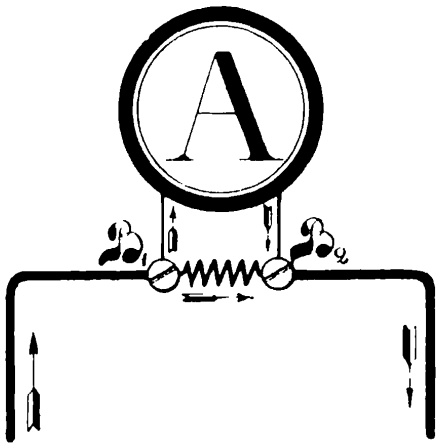


Рис. 61.

37. Количество электричества. Единица количества электричества. — При первомъ нашемъ знакомствѣ съ явленіемъ электрическаго тока мы уже указывали, что магнитное поле, наблюдаемое внѣ проводника, представляетъ собою только одну сторону происходящаго сложнаго процесса, что другая часть этого процесса совершается внутри самого проводника. Происходящее внутри проводника мы обычно разсматриваемъ, какъ теченіе вдоль проводника особаго дѣятеля — электричества. Совершенно такъ же, какъ въ случаѣ соотношенія между магнитной силой поля тока и силой тока, мы a priori должны допустить, что между скоростью протеканія электричества по цѣпи и силою тока должна существовать прямая пропорціональность. Если черезъ Δt обозначимъ элементъ времени, а черезъ Δq — элементарное *количество электричества*, протекающаго за это время сквозь нѣкоторое поперечное сѣченіе проводника, то очевидно скорость теченія электричества представится, какъ отношеніе:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t}$$

На основаніи предыдущаго можемъ слѣдующимъ образомъ представить связь между этой скоростью протеканія электричества и силой тока:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = ki,$$

гдѣ k есть нѣкоторый коэффиціентъ, зависящій отъ выбора единицъ.

Соотношеніе это подтверждается всѣми данными опыта. Множа правую и лѣвую части соотношенія на Δt, получаемъ:

$$\Delta q = ki \cdot \Delta t.$$

Для любого промежутка времени мы очевидно имѣемъ:

$$\Sigma \Delta q = q = \Sigma ki \cdot \Delta t.$$

Но въ случаѣ установившагося тока

$$i = \text{const.}$$

и слѣдовательно можемъ написать:

$$q = ki \cdot \Sigma \Delta t = kit.$$

Итакъ, мы имѣемъ соотношеніе между силой постояннаго тока и количествомъ электричества, протекшимъ черезъ поперечное сѣченіе проводника за любой промежутокъ времени. На основаніи этого мы можемъ установить и единицу количества электричества. Если положимъ:

$$k = 1,$$
$$i = 1 \text{ амперу},$$
$$t = 1 \text{ секундѣ},$$

то получимъ:

$$q = 1.$$

Такимъ образомъ, *практической электромагнитной единицей количества электричества будетъ то количество его, которое протекаетъ черезъ любое поперечное сѣченіе проводника въ одну секунду при силѣ тока въ одинъ амперъ.*

Эта единица количества электричества называется *амперъ-секундой* или *кулономъ*.

При примѣненіи практическихъ электромагнитныхъ единицъ наше основное соотношеніе принимаетъ, слѣдовательно, такой видъ:

$$q = it.$$

Если, напримѣръ, сила тока въ какомъ нибудь случаѣ была равна 10 амперамъ и токъ длился 1 минуту, то количество протекшаго за это время по цѣпи электричества равно:

$$10 \cdot 60 \quad 600 \text{ кулонамъ.}$$

38. Постоянство силы установившагося тока для всѣхъ частей цѣпи.—Если оставить въ сторонѣ періоды установленія и прекращенія тока въ цѣпи, такъ какъ въ это время имѣютъ мѣсто нѣкоторыя усложненія въ процессѣ тока, то непосредственнымъ опытомъ можно установить, что вообще говоря *сила тока одна и та же для всѣхъ частей цѣпи.* Въ какой бы части цѣпи мы ни расположили амперметръ, его показаніе не должно отъ этого зависѣть. Слѣдовательно, при установившемся токѣ черезъ любое поперечное сѣченіе проводника въ нѣкоторый промежутокъ времени протекаетъ одно и то же количество электричества. Согласно представленію Максвелля, *электричество ведетъ себя, какъ несжимаемая жидкость.* Въ виду этого при изученіи законовъ распредѣленія токовъ по проводникамъ можно пользоваться аналогіей съ матеріальной жидкостью, текущей по трубамъ. Не слѣдуетъ только усматривать въ этой аналогіи что либо большее, чѣмъ простое формальное сходство.

39. Связь между силою магнитнаго поля тока и силой тока.—Какъ было указано при выводѣ выраженія для электромагнитной силы (§ 34), сила магнитнаго поля тока выражается слѣдующимъ образомъ:

$$H = ki,$$

гдѣ k есть коэффиціентъ, зависящій отъ формы проводника и отъ выбора единицъ. Это соотношеніе должно быть справедливо для любой точки поля и для любой формы проводника. Въ каждомъ случаѣ мѣняется только значеніе коэффиціента k. Величину его можно установить всегда путемъ теоретическаго изслѣдованія его зависимости отъ разныхъ обстоятельствъ. Это однако выходитъ изъ рамокъ нашихъ задачъ, и мы этимъ теперь заниматься не будемъ. Разсмотримъ только въ общихъ чертахъ одинъ случай, имѣющій практическое значеніе. Мы имѣемъ въ виду магнитное поле внутри очень длинной прямолинейной катушки, или внутри кольцевой катушки, діаметръ витковъ которой малъ по сравненію съ діаметромъ кольца (рис. 62). Оказывается, что въ этомъ случаѣ во всѣхъ точкахъ внутри ка-

тушки магнитное поле имѣетъ одну и ту же силу, если только витки проволоки равномѣрно, т. е. одинаково густо, распредѣлены вдоль длины катушки. Въ случаѣ кольцевой катушки, представленной на рисункѣ, магнитныя линіи имѣютъ видъ замкнутыхъ концентрическихъ окружностей. Соотношеніе, приведенное выше для силы магнитнаго поля, справедливо, конечно, и въ этомъ случаѣ. Мы можемъ только здѣсь легко выдѣлить одну изъ составныхъ частей коэффиціента k. Дѣйствительно, въ каждой точкѣ внутри катушки мы имѣемъ дѣло съ наложеніемъ одной на другую магнитныхъ деформацій, обусловливаемыхъ каждымъ изъ витковъ въ отдѣльности. Слѣдовательно, результирующая деформація, а вмѣстѣ съ тѣмъ и сила результирующаго, общаго для всѣхъ витковъ, магнитнаго поля должна быть тѣмъ больше, чѣмъ больше при той же силѣ тока частота витковъ, т. е. чѣмъ больше ихъ приходится на единицу длины катушки. Мы можемъ, такимъ образомъ, сказать, что въ данномъ случаѣ *сила магнитнаго поля прямо-пропорціональна произведенію силы тока и числа витковъ, приходящихся на единицу длины*. Обозначая послѣднее число черезъ n_1, получаемъ:

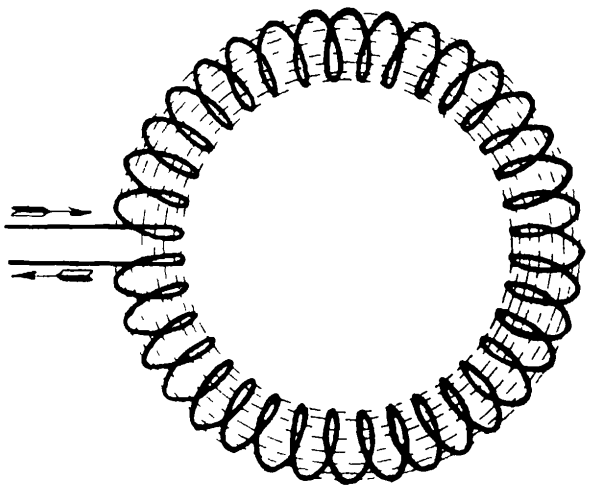


Рис. 62.

$$H = k' n_1 i.$$

40. Законъ магнитной цѣпи.—Разсмотримъ магнитный потокъ, возникающій внутри кольцевой катушки, изображенной на рис. 62, при прохожденіи черезъ нее тока. Прежде всего надо имѣть въ виду, что величина индукціи B будетъ одна и та же во всѣхъ точкахъ внутри катушки при условіи, конечно, что магнитная проницаемость вещества, заполняющаго внутренность катушки, постоянна. Это зависитъ отъ того, что въ данномъ случаѣ:

$$H = \text{const};$$

и слѣдовательно:

$$B = \mu H = \text{const}.$$

Обозначая площадь поперечнаго сѣченія катушки черезъ s, получаемъ такое выраженіе для полнаго магнитнаго потока внутри катушки:

$$\Phi = Bs = \mu Hs.$$

Но такъ какъ согласно предыдущему:

$$H = k' n_1 i,$$

то, подставляя это значеніе для H въ выраженіе магнитнаго потока, получаемъ:

$$\Phi = \mu k' n_1 i s.$$

Если, далѣе, обозначимъ черезъ n полное число витковъ кольцевой катушки, а черезъ l длину катушки, вѣрнѣе сказать, длину средней линіи ея, то очевидно:

$$n_1 = \frac{n}{l}.$$

Подставляемъ это въ выраженіе для Ф:

$$\Phi = \frac{\mu k' n i s}{l}.$$

Произведя теперь простую перестановку множителей въ правой части равенства, имѣемъ въ результатѣ:

$$\Phi = \frac{ni}{\frac{l}{k' \mu s}}.$$

Введемъ теперь слѣдующія обозначенія:

$$F = ni,$$
$$R = \frac{l}{k' \mu s}.$$

Тогда соотношеніе для магнитнаго потока принимаетъ слѣдующій видъ:

$$\Phi = \frac{F}{R}.$$

По аналогіи съ формулой Ома (см. § 20), F называется *магнитодвижущей силой*, а R *магнитнымъ сопротивленіемъ* того пути, по которому проходитъ магнитный потокъ, т. е. такъ называемой *магнитной цѣпи*. А все послѣднее соотношеніе носитъ названіе *закона магнитной цѣпи*.

Магнитодвижущая сила представляетъ собою произведеніе полнаго числа витковъ и силы тока. Это произведеніе обыкновенно называютъ числомъ *амперъ-витковъ*. Итакъ, полное число амперъ-витковъ данной катушки представляетъ собою ея магнитодвижущую силу. Что же касается магнитнаго сопротивленія, то оно зависитъ отъ геометрическихъ размѣровъ и магнитной проницаемости той части пространства, которая играетъ роль магнитной цѣпи.

Законъ магнитной цѣпи былъ выведенъ нами для простѣйшаго случая. Болѣе сложное изслѣдованіе, которымъ мы здѣсь заниматься не будемъ, показываетъ, что этотъ законъ имѣетъ мѣсто во всѣхъ безъ исключенія случаяхъ, когда магнитный потокъ возбуждается электрическимъ токомъ. Магнитодвижущая сила всегда выражается полнымъ числомъ амперъ-витковъ, возбуждающихъ потокъ. Магнитное сопротивленіе въ общемъ случаѣ выражается нѣсколько сложнѣе, хотя все же въ основѣ его лежитъ простѣйшая форма, данная выше.

Законъ магнитной цѣпи играетъ въ электротехникѣ важную роль основного закона при расчетѣ всѣхъ электромагнитныхъ механизмовъ: динамомашинъ, двигателей и т. п.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

Электродвижущая сила.

41. Законъ электромагнитной индукціи.—Переходя къ разсмотрѣнію закона электромагнитной индукціи, вытекающаго непосредственно изъ опытовъ Фарадэя, мы прежде всего обратимъ вниманіе на слѣдующее обстоятельство. Представимъ себѣ схему основного опыта (рис. 63). Въ нашей замкнутой черезъ гальва-

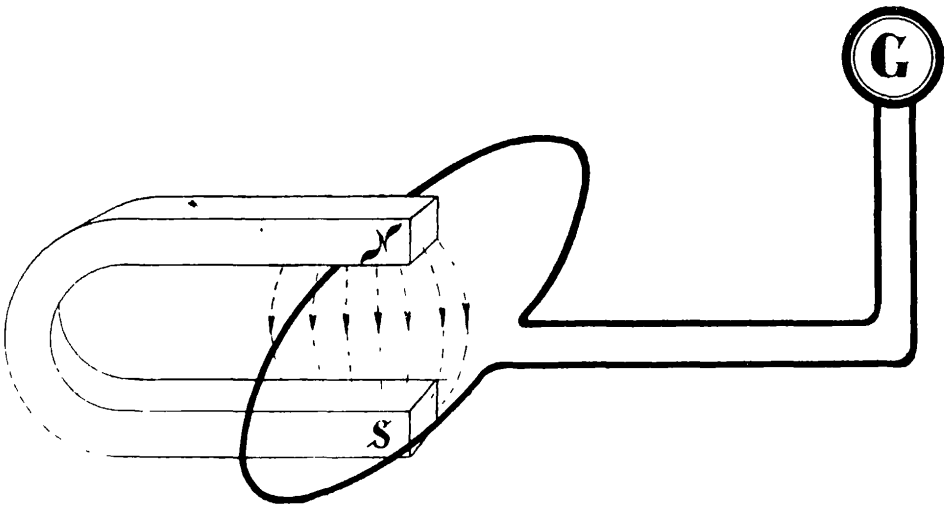


Рис. 63.

нометръ G цѣпи возникаетъ э.-д. сила всякій разъ, когда контуръ проводника рѣжетъ магнитныя линіи внѣшняго поля. И въ то же время измѣняется число магнитныхъ линій, сцѣпляющихся съ даннымъ контуромъ. Такъ какъ и наша электрическая цѣпь, и каждая магнитная линія, входящая въ составъ внѣшняго магнитнаго потока, представляютъ собою вполнѣ замкнутые контуры, то, слѣдовательно, геометрически невозможно допустить, чтобы магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ электрической

цѣпью, увеличился или уменьшился на нѣкоторое количество магнитныхъ линій и чтобы при этомъ какъ разъ такое же количество магнитныхъ линій не перерѣзало электрическую цѣпь, входя или выходя изъ ея контура. Такимъ образомъ, всегда *количество магнитныхъ линій, пересѣченныхъ въ нѣкоторомъ направленіи контуромъ электрической цѣпи, въ точности равно измѣненію магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ даннымъ контуромъ.* Въ виду этого при выводѣ всѣхъ количественныхъ соотношеній, характеризующихъ процессъ индуктированія э.-д. силы, мы будемъ часто говорить о приращеніи магнитнаго потока сквозь данный контуръ, какъ объ условіи возникновенія явленія индукціи. Это оказывается иногда удобнѣе въ практическомъ отношеніи.

Изъ многочисленныхъ изслѣдованій Фарадэя вытекаетъ слѣдующій основной законъ:

Количество электричества, протекшее по цѣпи подъ вліяніемъ индуктированной э.-д. силы, прямо-пропорціонально количеству пересѣченныхъ магнитныхъ линій и обратно-пропорціонально полному сопротивленію цѣпи.

Обозначая черезъ Δq—количество протекшаго электричества, черезъ $\Delta\Phi$—приращеніе магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ электрической цѣпью, и черезъ r—полное электрическое сопротивленіе ея, можемъ, слѣдовательно, написать:

$$\Delta q = k\frac{\Delta\Phi}{r},$$

гдѣ k есть коэффиціентъ пропорціональности.

Изъ этого основного закона нетрудно вывести выраженіе для индуктированной э.-д. силы. Для этого предположимъ, что во все то время Δt, за которое потокъ измѣнился на $\Delta\Phi$, сила тока была неизмѣнна, что практически вполнѣ осуществимо. Обозначая силу тока черезъ i, имѣемъ:

$$\Delta q = i\cdot\Delta t.$$

Подставляя это въ основное выраженіе и произведя перестановки, получаемъ:

$$ir = k\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Но согласно закону Ома:

$$ir = e$$

Слѣдовательно:

$$e = -k\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Переходя къ предѣламъ, получаемъ:

$$e = -k\frac{d\Phi}{dt},$$

т. е. индуктированная э.-д. сила прямо-пропорціональна скорости измѣненія потока Ф, сцѣпляющагося съ контуромъ цѣпи, или, что то же, скорости пересѣченія магнитныхъ линій даннымъ контуромъ.

Коэффиціентъ k зависитъ исключительно отъ выбора единицъ, принимаемыхъ для измѣренія входящихъ въ соотношеніе величинъ. Отъ вещества проводника этотъ коэффиціентъ, а слѣдовательно и э.-д. сила не зависятъ. Послѣднее весьма существенное свойство индуктированной э.-д. силы можетъ быть доказано слѣдующимъ опытомъ. Возьмемъ двѣ равныхъ геометрически цѣпи изъ различныхъ металловъ, напримѣръ изъ желѣза и мѣди, помѣстимъ ихъ вплотную одну къ другой и соединимъ ихъ между собою такъ, чтобы э.-д. силы, индуктируемыя въ нихъ, были направлены въ противоположныя стороны. Если такую составную цѣпь соединить съ гальванометромъ и помѣстить въ измѣняющееся магнитное поле, то мы не будемъ въ состояніи обнаружить въ ней индуктированнаго тока. Слѣдовательно, э.-д. силы въ соединенныхъ цѣпяхъ равны и противоположны, и потому мы заключаемъ, что величина индуктированной э.-д. силы не зависитъ отъ природы веществъ, входящихъ въ составъ электрической цѣпи.

На основаніи вышеизложеннаго ясно, что мы можемъ такъ подобрать единицу э.-д. силы, чтобы коэффиціентъ k сдѣлался равнымъ единицѣ. Кромѣ того, этому коэффиціенту придаютъ еще знакъ минусъ для того, чтобы соблюсти наше основное условіе, выражаемое правиломъ штопора. Итакъ, полагаемъ:

$$k = 1.$$

Въ такомъ случаѣ *законъ электромагнитной индукціи* принимаетъ слѣдующій видъ:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

т. е. *величина э.-д. силы, индуктируемой въ нѣкоторой цѣпи, равна скорости уменьшенія магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ этой цѣпи.*

Поясним нѣсколько сказанное выше о мотивахъ внесенія знака минуса въ выраженіе для индуктированной э.-д. силы. На рис. 64 представлена схематически нѣкоторая цѣпь и пронизы-

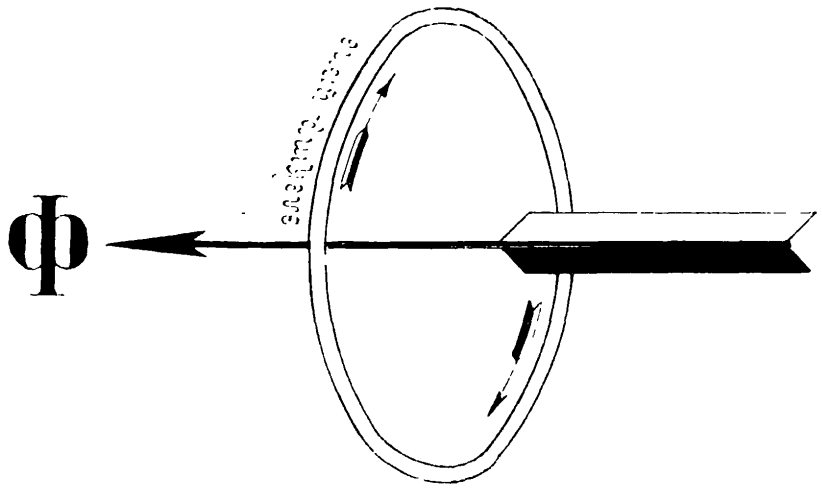


Рис. 64.

вающій ее магнитный потокъ Ф. Соотвѣтствующими стрѣлками показано положительное направленіе въ контурѣ цѣпи, связанное съ положительнымъ направленіемъ потока правиломъ штопора. Допустимъ теперь, что потокъ Ф увеличивается, т. е. что:

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0.$$

Въ такомъ случаѣ, какъ это слѣдуетъ изъ приведенной выше формулировки закона электромагнитной индукціи, имѣемъ:

$$e < 0,$$

т. е. индуктируемая благодаря увеличенію потока Φ э.-д. сила направлена въ отрицательную сторону. Этотъ же результатъ можетъ быть полученъ и при помощи правила правой руки, если разсмотрѣть любую часть контура, пересѣкаемую входящими въ контуръ магнитными линіями.

Совершенно аналогично, если потокъ Φ уменьшается, т. е.

$$\frac{d\Phi}{dt} < 0,$$

то, имѣемъ:

$$e > 0,$$

т. е. э.-д. сила направлена въ положительную сторону, что можетъ быть подтверждено и помощью правила правой руки. Надо только имѣть въ виду, что потокъ Φ теперь уменьшается и, слѣдовательно, магнитныя линіи пересѣкаютъ контуръ, выходя изъ него.

Необходимость введенія знака минуса въ выраженіе закона индукціи можно еще разсматривать, какъ слѣдствіе существованія инерціи во всякой электромагнитной системѣ. Это свойство инерціи формулируется закономъ Ленца въ той обобщенной формѣ, которая приведена въ § 32. Дѣйствительно, съ точки зрѣнія этого закона, э.-д. сила, индуктируемая въ нѣкоторой цѣпи, представляетъ собою силу, съ которою электромагнитная система реагируетъ на измѣненіе магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ цѣпи. И, какъ всякая сила реакціи, она по природѣ своей отрицательна, ибо она стремится противодѣйствовать происходящимъ въ системѣ измѣненіямъ: стремится ослабить магнитный потокъ, если онъ увеличивается, и усилить его, если онъ уменьшается.

Соотношеніе:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

выражаетъ собою одинъ изъ основныхъ законовъ природы. Оно справедливо во всѣхъ случаяхъ, каковы бы ни были форма и размѣры цѣпи, каковъ бы ни былъ характеръ измѣненій магнитнаго потока.

Для того, чтобы практическія приложенія этого закона не могли вызвать какихъ либо недоразумѣній, разсмотримъ еще случай контура болѣе сложнаго, чѣмъ изображенный на рис. 63. Именно допустимъ, что часть нашего контура, приходящая въ соприкосновеніе съ внѣшнимъ магнитнымъ полемъ, состоитъ изъ нѣсколькихъ витковъ, тождественныхъ въ геометрическомъ отношеніи и тѣсно сближенныхъ между собою (рис. 65). Въ данномъ случаѣ э.-д. силу, индуктируемую въ цѣпи, можно выразить двумя способами. Можно, во-первыхъ, разсуждать такъ. Въ виду геометрической тождественности витковъ въ каждомъ изъ нихъ индуктируется одна и та же э.-д.-сила:

$$e' = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Если число витковъ есть n, то полная э.-д. сила въ цѣпи должна быть въ n разъ больше, такъ какъ всѣ отдѣльныя э.-д. силы дѣйствуетъ въ цѣпи въ одномъ и томъ же направленіи. Итакъ, полная э.-д. сила, индуктируемая въ нашемъ сложномъ контурѣ, выразится слѣдующимъ образомъ:

$$e = -n\frac{d\Phi}{dt}.$$

Въ этомъ случаѣ Φ есть реально существующій потокъ, пронизывающій каждый изъ n витковъ.

Можно однако поступить иначе. Именно, можно исходить изъ представленія о *полномъ магнитномъ потокѣ*, сцѣпляющемся съ данною электрическою цѣпью. Для того, чтобы получить

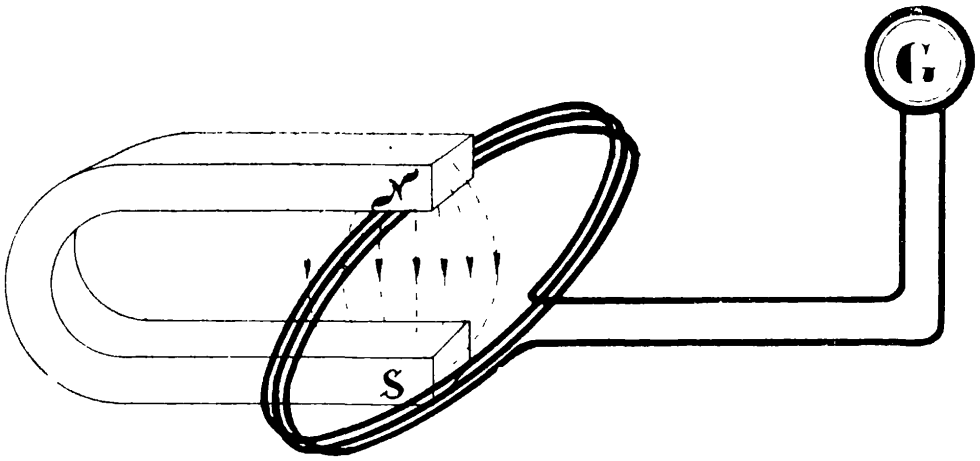


Рис. 65.

величину полнаго магнитнаго потока, надо установить величину потока, сцѣпляющагося съ каждымъ виткомъ въ отдѣльности, и затѣмъ просуммировать эти отдѣльные потоки. Въ результатѣ и получимъ полный магнитный потокъ. Обозначая его черезъ Φ', для нашего случая геометрически тождественныхъ n витковъ имѣемъ:

$$\Phi' = n\Phi.$$

Ясно, конечно, что въ нашемъ случаѣ индуктированная э.-д. сила выразится такъ:

$$e = -\frac{d\Phi'}{dt},$$

т. е. выраженіе для нея получается такое же, какъ и въ случаѣ простѣйшаго контура, изображеннаго на рис. 63.

Представленіе о полномъ магнитномъ потокѣ, въ сущности говоря, эквивалентно представленію о полномъ числѣ сцѣпленій реально существующаго потока съ даннымъ сложнымъ контуромъ. Полный магнитный потокъ не существуетъ, какъ таковой, если только мы имѣемъ дѣло со сложнымъ контуромъ. Онъ является нѣкоторой фикціей, важное практическое значеніе которой дѣлается особенно яснымъ въ случаѣ, когда отдѣльные витки сложной цѣпи не тождественны одинъ другому, и магнитные потоки, сцѣпляющіеся съ каждымъ изъ нихъ, не равны по величинѣ, хотя могутъ представлять собою большія или меньшія части одного и того же реально существующаго потока. Примѣръ подобныхъ условій представленъ на рис. 66. Катушка K, состоящая изъ n витковъ, находится въ полѣ маг-

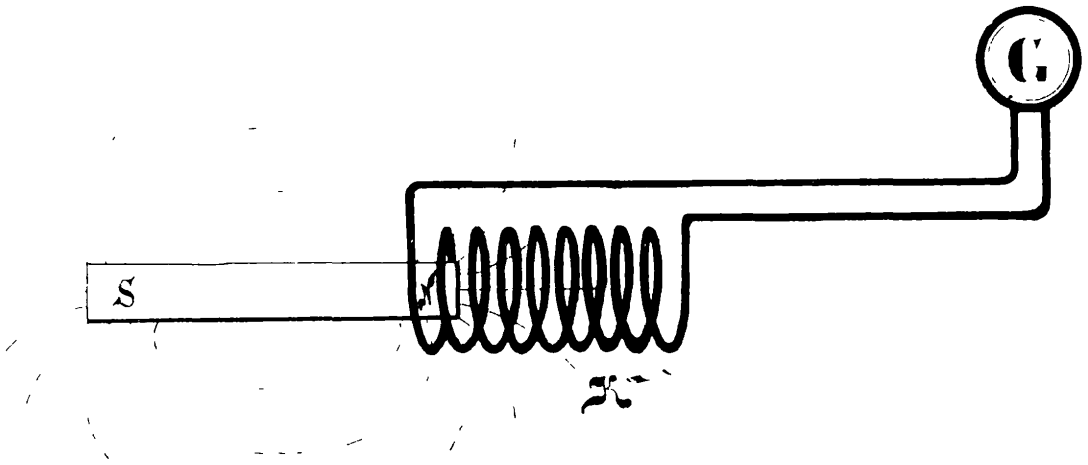


Рис. 66.

нита NS. При этомъ, однако, отдѣльные витки находятся въ различныхъ условіяхъ. Хотя всѣ они и находятся въ сферѣ дѣйствія одного и того же магнитнаго потока, исходящаго изъ полюса N, однако съ каждымъ изъ нихъ сцѣпляется различная доля этого потока. Обозначая эти потоки, сцѣпляющіеся съ отдѣльными витками, черезъ Φ_1, Φ_2, Φ_3 и т. д., получаемъ э.-д. силы, индуктируемыя въ отдѣльныхъ виткахъ при относительномъ перемѣщеніи магнита и катушки:

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$e_3 = \frac{d\Phi_3}{dt}$$

. . . . . .

Полную э.-д. силу, индуктируемую въ цѣпи, получимъ, просуммировавъ отдѣльныя э.-д. силы:

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + \ldots = \\ = -\frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt} - \frac{d\Phi_3}{dt} - \ldots = \\ = -\frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \ldots)}{dt} = \\ = -\frac{d\Phi'}{dt},$$

гдѣ

$$\Phi' = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \ldots$$

есть полный магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ катушкою K.

Если бы въ данномъ случаѣ мы не воспользовались представленіемъ о полномъ магнитномъ потокѣ, то должны были бы остановиться на болѣе сложномъ выраженіи для э.-д. силы, именно на рядѣ производныхъ, число которыхъ равно числу витковъ.

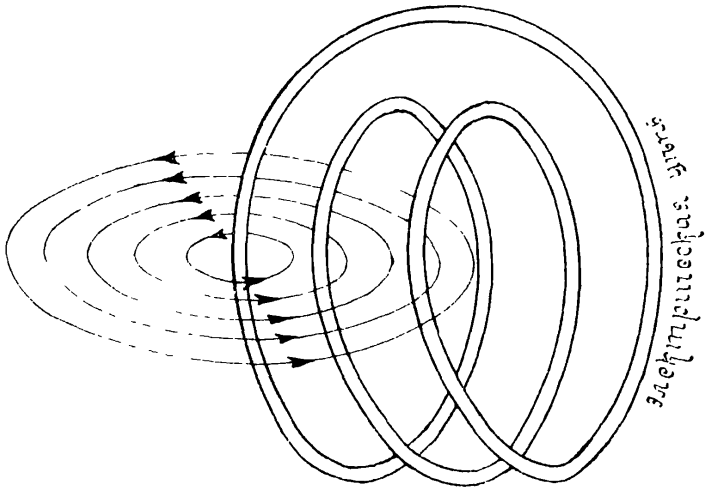


Рис. 67.

Для иллюстраціи указаннаго выше способа опредѣленія полнаго магнитнаго потока на рис. 67 представлены: цѣпь, состоящая изъ трехъ витковъ, и пять магнитныхъ линій, различнымъ образомъ связанныхъ съ цѣпью. Въ данномъ случаѣ реально существуетъ потокъ Φ, равный 5 максвеллямъ. Полный магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ электрическою цѣпью, выразится, какъ сумма чиселъ сцѣпленій съ отдѣльными витками:

$$\Phi' = 5 + 4 + 2 = 11 \text{ максвеллямъ}.$$

Такъ какъ рѣчь идетъ о числѣ сцѣпленій потока съ контуромъ цѣпи, то можно при исчисленіи Φ' поступить и иначе. Именно можно просуммировать числа сцѣпленій контура цѣпи съ каждой отдѣльной магнитной линіей, другими словами числа проводниковъ, проходящихъ сквозь контуръ каждой магнитной

линій. Этотъ способъ иногда удобнѣе, ибо контуръ магнитной линіи всегда замкнутъ, между тѣмъ какъ контуръ отдѣльнаго витка можетъ быть настолько неясно выраженъ, что могутъ произойти затрудненія при счетѣ числа магнитныхъ линій, пронизывающихъ его. Примѣняя этотъ второй методъ исчисленія Φ' къ настоящему случаю, получаемъ:

$$\Phi' = 1 + 2 + 2 + 3 + 3 = 11 \text{ максвеллямъ.}$$

42. Единицы электродвижущей силы. — Какъ было указано при выводѣ соотношенія:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

мы должны соотвѣтствующимъ образомъ подобрать единицу э.-д. силы. При выборѣ ея мы должны исходить изъ этого соотношенія. Допустимъ теперь, что Φ равномѣрно измѣняется со скоростью одного максвелля въ секунду. Въ такомъ случаѣ:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \pm 1.$$

и слѣдовательно:

$$e = \mp 1.$$

Мы получаемъ такимъ образомъ абсолютную единицу э.-д. силы.

Абсолютная электромагнитная единица э.-д. силы есть такая э.-д. сила, которая индуктируется въ проводящемъ контурѣ, если магнитный потокъ, съ нимъ сцѣпляющійся, равномѣрно измѣняется со скоростью одного максвелля въ секунду.

Въ виду малости этой единицы, за *практическую электромагнитную единицу э.-д. силы* принимается 100 милліоновъ абсолютныхъ единицъ. Эта практическая единица называется *вольтомъ*. Итакъ:

$$1 \text{ вольтъ} = 10^8 \text{ абс. эл.-магн. ед.}$$

43. Электродвижущія силы взаимной индукціи. — Разсмотримъ теперь какія-либо двѣ произвольныя цѣпи, расположенныя одна близъ другой. Какъ мы уже знаемъ изъ § 31, установленіе или исчезновеніе тока въ любой изъ этихъ цѣпей сопровождается появленіемъ индуктированныхъ э.-д. силъ и тока въ другой, ибо при этомъ магнитный потокъ первой цѣпи пересѣкаетъ въ томъ или иномъ направленіи вторую цѣпь. Мы можемъ выра-

зиться и иначе. Мы можемъ сказать, что э.-д. сила и токъ индуктируются во второй изъ цѣпей, потому что измѣняется магнитный потокъ, пронизывающій ее и создаваемый первой цѣпью. И это конечно должно имѣть мѣсто не только въ случаѣ установленія или прекращенія, но и въ случаѣ какого бы то ни было измѣненія тока въ одной изъ цѣпей, такъ какъ при этомъ будетъ измѣняться и магнитный потокъ этой цѣпи. Въ § 31 былъ описанъ общій характеръ явленія, теперь же мы займемся нѣкоторыми количественными соотношеніями. Положимъ, имѣемъ двѣ цѣпи I и II (рис. 68). По первой цѣпи течетъ токъ i_1. Токъ этотъ возбуждается благодаря нѣкоторому генератору, напримѣръ, динамомашинѣ, расположенной въ цѣпи, но не показанной на рисункѣ. Очевидно, токъ создаетъ въ окружающемъ пространствѣ магнитный потокъ, который вообще говоря будетъ пронизывать и контуръ второй хотя бы нѣкоторой своей частью. Такъ какъ сила магнитнаго поля во всѣхъ точкахъ будетъ прямо-пропорціональна силѣ тока i_1 (см. § 39), то и весь магнитный потокъ, создаваемый этимъ токомъ, и часть его, сцѣпляющаяся со второю цѣпью, будутъ также прямо-пропорціональны силѣ тока i_1. Обозначая эту часть магнитнаго потока черезъ Φ'', можемъ написать:

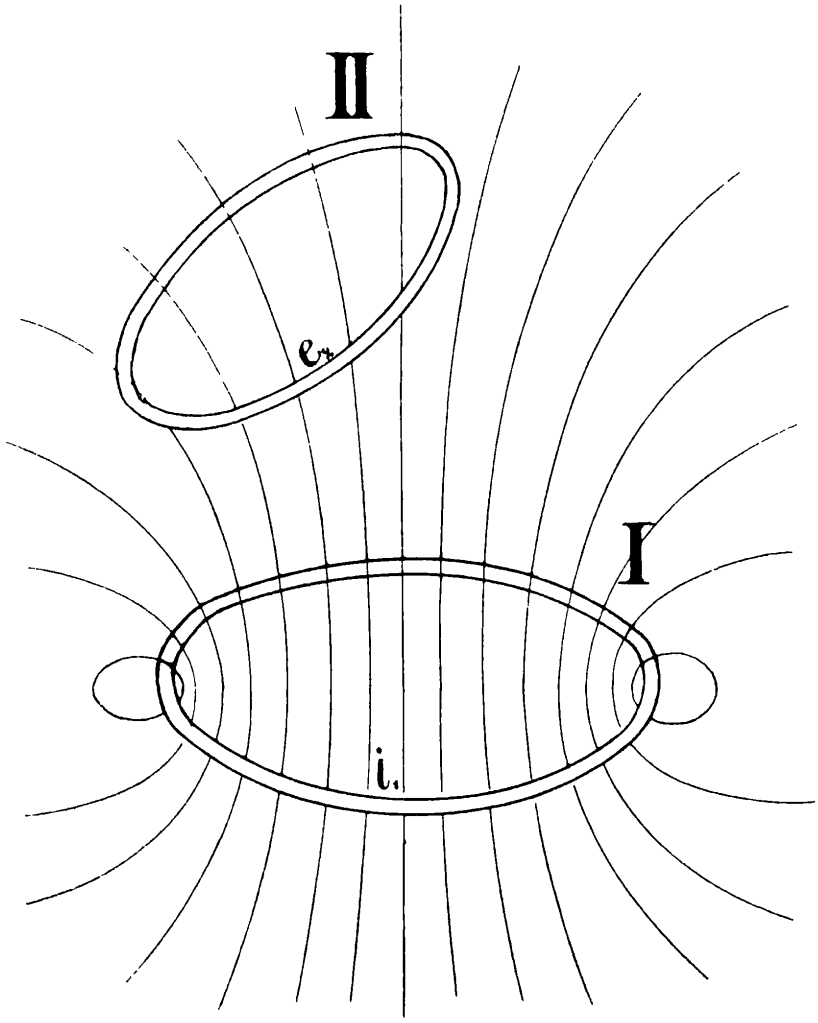


Рис. 68.

$$\Phi'' = Mi_1,$$

гдѣ M есть коэффиціентъ пропорціональности, зависящій отъ геометрическихъ размѣровъ контуровъ, ихъ взаимнаго расположенія и магнитной проницаемости среды.

При всякомъ измѣненіи i_1 очевидно будетъ измѣняться и Φ'' и при этомъ въ цѣпи II будетъ индуктироваться э.-д. сила. На основаніи предыдущаго можемъ выразить ее слѣдующимъ образомъ:

$$e_2 = -\frac{d\Phi''}{dt} = -\frac{d(Mi_1)}{dt}.$$

Ясно, что въ случаѣ, когда, во-первыхъ, цѣпи I и II неподвижны и неизмѣняемы и, во-вторыхъ, окружающая среда обладаетъ постоянною магнитною проницаемостью, M есть величина постоянная, т. е.

$$M = \text{const.}$$

и для э.-д. силы, индуктируемой во второй цѣпи, получаемъ:

$$e_2 = -M\frac{di_1}{dt}.$$

Совершенно аналогично надо разсматривать и обратный случай, когда по второй цѣпи протекаетъ измѣняющійся токъ i_2 и индуктируетъ въ первой цѣпи э.-д. силу e_1. Величина ея выразится подобнымъ же образомъ:

$$e_1 = -M'\frac{di_2}{dt},$$

гдѣ M' опять есть коэффиціентъ пропорціональности.

Итакъ мы имѣемъ два соотношенія:

$$e_2 = -M\frac{di_1}{dt}$$

и

$$e_1 = -M'\frac{di_2}{dt},$$

характеризующихъ свойство электромагнитной инерціи нашей системы, состоящей изъ двухъ цѣпей. При этомъ мы должны понимать цѣпи въ самомъ широкомъ смыслѣ: не только самыя проволоки, но и всю окружающую ихъ среду, при ближайшемъ участіи которой развивается процессъ электромагнитной индукціи. Э.-д. силы e_2 и e_1 представляютъ собою силы, съ которыми именно среда реагируетъ на измѣненія тока въ одной изъ частей системы. Степень этихъ измѣненій вполнѣ опредѣляется при неизмѣнныхъ общихъ условіяхъ производными то-

ковъ по времени. Надо полагать, что электромагнитная среда должна одинаково реагировать на измѣненіе въ системѣ, произойдетъ ли оно въ цѣпи I или II, если только конечно степень измѣненій будетъ тождественна въ обоихъ случаяхъ.

Слѣдовательно, если:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt},$$

то должно ожидать, что и

$$e_2 = e_1;$$

а въ такомъ случаѣ:

$$M = M'.$$

Такъ въ дѣйствительности и есть: индукціонныя дѣйствія первой цѣпи на вторую опредѣляются тѣмъ же коэффиціентомъ, что и индукціонныя дѣйствія второй цѣпи на первую.

Вслѣдствіе этого равенства величина M или M' называется *коэффиціентомъ взаимной индукціи*, а э.-д. силы, опредѣляемыя черезъ посредство этого коэффиціента, называются *э.-д. силами взаимной индукціи.*

Остановимся теперь на выясненіи физическаго смысла коэффиціента взаимной индукціи M. Предположимъ, что:

$$i_1 = 1.$$

Въ такомъ случаѣ на основаніи предыдущаго:

$$\Phi'' = M,$$

т. е. *коэффиціентъ взаимной индукціи двухъ цѣпей численно равенъ полному потоку, сцѣпляющемуся съ одной изъ нихъ, когда по другой идетъ токъ, сила котораго равна единицѣ.*

Можно еще и другимъ путемъ подойти къ физическому значенію коэффиціента M. Представимъ себѣ, что сила тока въ первой цѣпи равномѣрно измѣняется со скоростью единицы въ секунду, т. е.

$$\frac{di_1}{dt} = -1.$$

При этомъ выраженіе для э. д. силы e_2 приметъ слѣдующій видъ:

$$e_2 = +M,$$

т. е. *коэффиціентъ взаимной индукціи двухъ цѣпей численно равенъ э.-д. силѣ, возникающей въ одной изъ нихъ, когда въ*

другой токъ равномѣрно измѣняется со скоростью единицы въ секунду.

Если при условіи:

$$\frac{di_1}{dt} = \mp 1,$$

и

$$e_2 = \mp 1,$$

то получаемъ:

$$M = 1.$$

Если э.-д. сила выражается въ вольтахъ, а сила тока въ амперахъ, то имъ соотвѣтствуетъ практическая электромагнитная единица коэффиціента взаимной индукціи, называемая *генри*.

Итакъ, *коэффиціентомъ взаимной индукціи въ одинъ генри обладаютъ такія двѣ цѣпи, въ одной изъ которыхъ возникаетъ э.-д. сила въ одинъ вольтъ въ то время, какъ въ другой сила тока равномѣрно измѣняется со скоростью одного ампера въ секунду.*

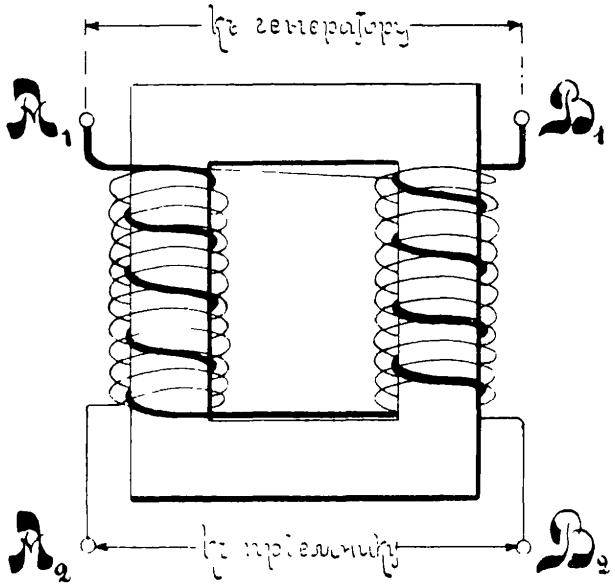


Рис. 69.

Для иллюстраціи сказаннаго выше о взаимной индукціи остановимся вкратцѣ на *трансформаторѣ* перемѣннаго тока. Приборъ этотъ, широко примѣняемый въ современной электротехникѣ, служитъ для того, чтобы переносить электрическую энергію изъ одной цѣпи въ другую, совершенно обычно изолированную отъ первой. Съ этою цѣлью обѣ цѣпи связываются между собою магнитною связью — общимъ магнитнымъ потокомъ, который и оказывается передатчикомъ энергіи изъ первой цѣпи во вторую. На рис. 69 представлена схема трансформатора. Онъ состоитъ изъ желѣзнаго сердечника, которому чаще всего придаютъ форму прямоугольной рамы, и окружающихъ его двухъ обмотокъ, такъ называемыхъ первичной и вторичной. Въ данномъ случаѣ первичная, представленная жирной линіей, содержитъ въ себѣ меньше витковъ, чѣмъ вторичная, изображенная тонкой линіей. A_1 и B_1 - зажимы первичной обмотки, A_2 и B_2 — зажимы вторичной. Первичная обмотка включается въ цѣпь

альтернатора, отъ котораго она питается перемѣннымъ токомъ. Во вторичной же обмоткѣ индуктируется перемѣнная э.-д. сила, возбуждающая токъ во вторичной цѣпи, содержащей въ себѣ пріемникъ, т. е. приборъ или механизмъ, потребляющій электрическую энергію. Примѣненіе желѣзнаго сердечника въ данномъ случаѣ имѣетъ цѣлью увеличеніе коэффиціента взаимной индукціи. Въ этомъ сердечникѣ благодаря первичному току создается перемѣнный потокъ, который и возбуждаетъ э.-д. силу во вторичной цѣпи. Ради упрощенія допустимъ, что въ трансформаторѣ отсутствуетъ разсѣяніе, т. е. что черезъ всѣ витки первичной и вторичной обмотокъ проходитъ одинъ и тотъ же магнитный потокъ. Въ такомъ случаѣ, явленія, происходящія при работѣ трансформатора, можно представить себѣ въ слѣдующемъ видѣ. Первичный перемѣнный токъ i_1 создаетъ первичный магнитный потокъ Φ_1, также измѣняющійся съ теченіемъ времени и потому индуктирующій во вторичной обмоткѣ э.-д. силу e_2. Если обозначимъ числа витковъ обѣихъ обмотокъ черезъ n_1 и n_2, то можно написать:

$$e_2 = -M\frac{di_1}{dt} = -n_2\frac{d\Phi_1}{dt}.$$

Въ свою очередь перемѣнный токъ i_2, возникающій во вторичной обмоткѣ, обусловливаетъ э.-д. силу взаимной индукціи въ первичной обмоткѣ:

$$e_1 = -M\frac{di_2}{dt} = -n_1\frac{d\Phi_2}{dt},$$

гдѣ Φ_2—есть потокъ, возбуждаемый токомъ i_2.

Таковы э.-д. силы взаимной индукціи, появляющіяся въ первичной и во вторичной обмоткахъ трансформатора.

Изъ приведенныхъ соотношеній совершенно ясна роль числа витковъ обмотки: чѣмъ больше, напримѣръ, число витковъ вторичной обмотки, тѣмъ будетъ больше возникающая въ ней э.-д. сила взаимной индукціи. Дѣлая n_2 больше или меньше, мы можемъ по произволу подбирать значеніе e_2.

Въ дѣйствительности въ обмоткахъ трансформатора кромѣ э.-д. силъ взаимной индукціи e_1 и e_2 индуктируются еще и другія э.-д. силы, съ характеромъ которыхъ мы познакомимся въ слѣдующемъ §. Эти э. д. силы, складываясь съ e_1 и e_2, даютъ полныя э.-д. силы e_1' и e_2', индуктируемыя въ первичной и вторичной обмоткахъ. Изъ нихъ э.-д. сила e_1', являясь реакціей

электромагнитной системы, противодѣйствующей внѣшней э. д. силѣ, т.-е. э.-д. силѣ альтернатора, направлена обратно этой послѣдней. Слѣдовательно э.-д. сила альтернатора для того, чтобы посылать токъ черезъ первичную обмотку трансформатора, должна преодолѣвать э. д. силу e_1'. Это и составляетъ работу, передаваемую трансформатору со стороны альтернатора. Далѣе эта работа передается помощью магнитнаго потока во вторичную цѣпь. Здѣсь результирующая индуктированная э.-д. сила e_2' возбуждаетъ токъ i_2 и возстанавливаетъ въ пріемникѣ значительную долю той работы, которая передана альтернаторомъ первичной обмоткѣ. Для того, чтобы составить себѣ представленіе о величинѣ результирующихъ э.-д. силъ e_1' и e_2', можно разсуждать слѣдующимъ образомъ. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 сосуществуютъ въ одномъ и томъ же сердечникѣ и потому они сливаются въ одинъ общій потокъ Ф—главный магнитный потокъ,—мгновенное значеніе котораго въ каждый данный моментъ есть алгебраическая сумма значеній потоковъ Φ_1 и Φ_2. Этотъ результирующій магнитный потокъ Ф и индуктируетъ въ обмоткахъ трансформатора э.-д. силы e_1' и e_2'. Въ виду этого имѣемъ:

$$e_1' = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2' = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отсюда получаемъ:

$$\frac{e_1'}{e_2'} = \frac{n_1}{n_2},$$

т. е. полныя э.-д. силы, индуктируемыя въ первичной и вторичной обмоткахъ трансформатора, относятся одна къ другой такъ, какъ соотвѣтствующія числа витковъ. Э.-д. сила альтернатора обычно того же порядка, что и обратная ей э.-д. сила e_1': онѣ даже почти равны по абсолютной величинѣ. Такимъ образомъ при помощи трансформатора мы можемъ вмѣсто цѣпи съ малой э.-д. силой создать цѣпь съ большой э.-д. силой или наоборотъ. Въ этомъ и заключается главная роль трансформатора.

Къ классу трансформаторовъ надо отнести *индукціонную катушку* или, какъ ее называютъ, *катушку Румкорфа*. Схематически устройство ее показано на рис. 70. *F*—есть желѣзный сердечникъ, на который намотаны первичная и вторичная об-

мотки (I и II). Первичная—содержитъ сравнительно небольшое количество витковъ, въ составъ же вторичной обмотки входитъ обычно очень большое число витковъ. Это дѣлается для полученія во вторичной обмоткѣ большихъ э.-д. силъ, порядка десятковъ и сотенъ тысячъ вольтъ. K_2, K_2—зажимы вторичной высоковольтной обмотки. K_1, K_1—зажимы первичной. Эта послѣдняя питается обычно не перемѣннымъ токомъ отъ альтернатора, а прерывчатымъ токомъ постояннаго направленія, который берутъ отъ какого либо генератора постояннаго тока. Автоматически повторяющіяся быстрыя прерыванія тока достигаются помощью *прерывателя*. Онъ устроенъ въ общемъ слѣдующимъ образомъ. Кусокъ мягкаго желѣза A удерживается пружиною, закрѣпленною въ точкѣ C, въ нѣкоторомъ разстояніи отъ конца желѣзнаго

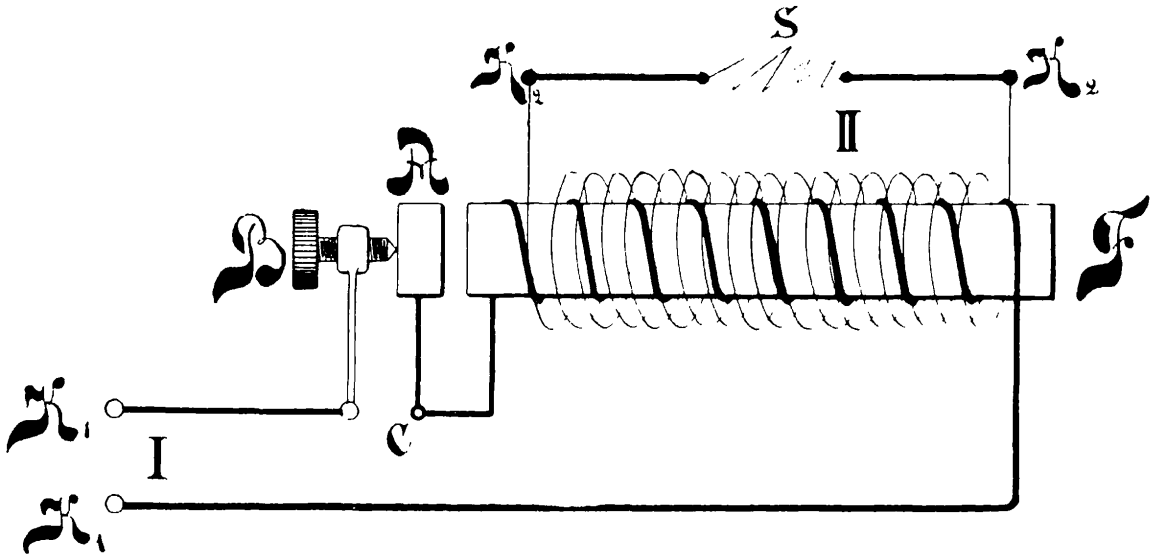


Рис. 70.

сердечника. Съ другой стороны этотъ молоточекъ A упирается въ винтъ B. Первичный токъ идетъ черезъ B, A и C. При прохожденіи его сердечникъ намагничивается и притягиваетъ молоточекъ A. При этомъ контактъ между A и B нарушается и токъ обрывается. Сердечникъ размагничивается благодаря этому, молоточекъ возвращается въ первоначальное положеніе, и все вновь повторяется и т. д. Благодаря очень большой э.-д. силѣ во вторичной цѣпи, катушки Румкорфа примѣняются для возбужденія тока въ цѣпяхъ съ большимъ электрическимъ сопротивленіемъ. Такъ между прочимъ онѣ примѣняются для полученія токовъ черезъ воздухъ и вообще газообразную среду, которая въ обычныхъ условіяхъ является изоляторомъ, но подъ вліяніемъ большой э.-д. силы теряетъ эти свойства и начинаетъ проводить токъ въ видѣ *искры* S или въ другой формѣ (рис. 70).

44. Электродвижущая сила самоиндукціи.—Представимъ себѣ, что тѣ два контура, которые изображены на рисункѣ 68, начинаютъ сближаться между собою, и что при этомъ контуръ, скажемъ, вторичной цѣпи II, измѣняется по формѣ и размѣрамъ, дѣлаясь болѣе похожимъ на контуръ цѣпи I. Очевидно при этомъ все большая и большая часть потока, создаваемаго первичною цѣпью, будетъ сцѣпляться со вторичною, т. е. по мѣрѣ сближенія цѣпей коэффиціентъ взаимной индукціи M возрастаетъ. Въ предѣлѣ, въ моментъ сліянія двухъ тождественныхъ цѣпей I и II, мы получимъ наибольшее возможное при неизмѣняемости контура I значеніе коэффиціента M. Мы имѣемъ предѣльный случай взаимодѣйствія двухъ цѣпей и мы можемъ въ результатѣ имѣть дѣло лишь съ одною цѣпью, разсматривая ее же и какъ предѣлъ отсутствующей второй. Въ такомъ случаѣ при измѣненіи тока въ подобной единственной цѣпи должна обнаруживаться индуктированная э.-д. сила въ этой же самой цѣпи. Природа подобной э.-д. силы должна быть такая же, что и э.-д. силы взаимной индукціи: и та, и другая возникаютъ вслѣдствіе измѣненія сцѣпляющагося съ контуромъ цѣпи магнитнаго потока. Этотъ предѣльный случай взаимной индукціи обычно называютъ *самоиндукціей*, а предѣльное значеніе коэффиціента взаимной индукціи называютъ *коэффиціентомъ самоиндукціи* и обозначаютъ его буквою L. Такъ какъ всѣ соотношенія должны имѣть тотъ же характеръ, что и въ случаѣ взаимной индукціи, то можемъ написать для *потока самоиндукціи*, т. е. для потока, создаваемаго токомъ и сцѣпляющагося съ контуромъ этого тока:

$$\Phi = Li$$

и для *э.-д. силы самоиндукціи:*

$$e = -\frac{d\,(Li)}{dt}.$$

Въ случаѣ постоянной магнитной проницаемости среды и неизмѣняемости геометрическихъ размѣровъ контура цѣпи будемъ очевидно имѣть:

$$L = \text{const.}$$

и выраженіе для э.-д. силы самоиндукціи приметъ видъ:

$$e = -L\frac{di}{dt}.$$

Если:

$$i = 1,$$

то получаемъ:

$$\Phi = L,$$

т. е. *коэффиціентъ самоиндукціи нѣкоторой цѣпи численно равенъ полному потоку, сцѣпляющемуся съ контуромъ этой цѣпи при силѣ тока, равной единицѣ.*

Если же:

$$\frac{di}{dt} = 1,$$

то получаемъ другое соотношеніе, выясняющее значеніе L:

$$e = L,$$

т. е. *коэффиціентъ самоиндукціи нѣкоторой цѣпи численно равенъ э.-д. силѣ, индуктирующейся въ этой же цѣпи, когда сила тока въ ней равномѣрно измѣняется со скоростью единицы въ секунду.*

Наконецъ, если:

$$\frac{di}{dt} = 1$$

и

$$e = 1$$

то имѣемъ:

$$L = 1.$$

Выражая силу тока въ амперахъ, а э.-д. силу въ вольтахъ, получаемъ практическую электромагнитную единицу коэффиціента самоиндукціи, которая очевидно должна быть вполнѣ тождественна съ единицей коэффиціента взаимной индукціи и потому тоже называется *генри*.

И такъ, *коэффиціентомъ самоиндукціи въ одинъ генри обладаетъ такая цѣпь, въ которой индуктируется э.-д. сила, равная одному вольту, когда сила тока въ этой же цѣпи равномѣрно измѣняется со скоростью одного ампера въ секунду.*

Явленіе самоиндукціи было открыто Фарадэемъ. Опишемъ одинъ изъ его опытовъ, въ которомъ очень отчетливо проявляется э.-д. сила самоиндукціи. Схема этого опыта представлена на рисункѣ 71. Генераторъ D возбуждаетъ токъ въ сложной цѣпи, въ которой между точками A и B имѣются двѣ параллельныя вѣтви: гальванометръ G и катушка L съ большимъ коэффиціентомъ самоиндукціи, что достигается примѣненіемъ большого

числа витковъ и желѣзнаго сердечника. Допустимъ, что токъ идетъ, какъ показано на рисункѣ стрѣлками. При этомъ и въ катушкѣ L, и въ гальванометрѣ G онъ идетъ отъ A къ B. K представляетъ собою рубильникъ, который въ данномъ случаѣ включенъ. При установившемся постоянномъ токѣ гальванометръ

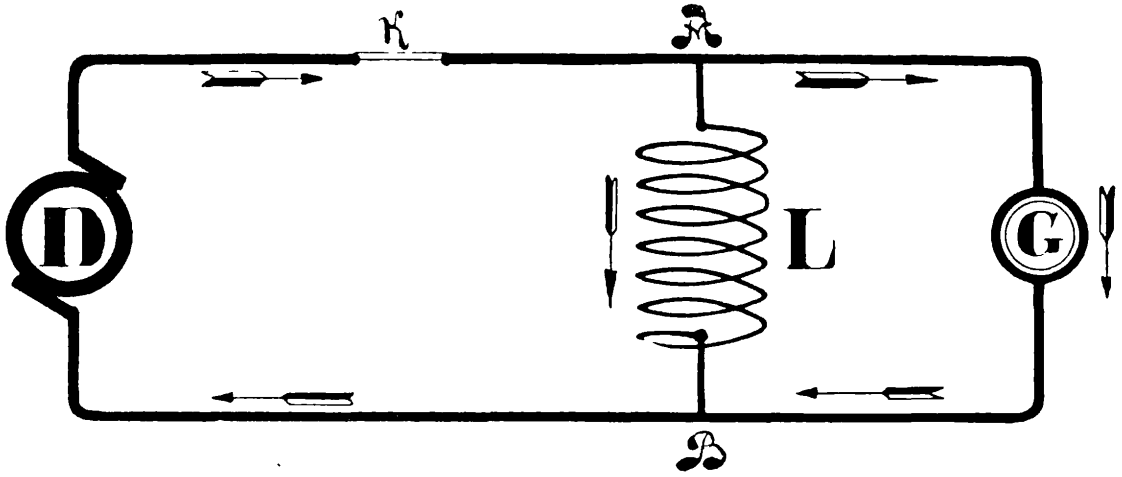


Рис. 71.

долженъ показывать нѣкоторое опредѣленное отклоненіе. Фарадэй въ своемъ опытѣ устроилъ такъ, чтобы это отклоненіе не имѣло мѣста, хотя бы токъ и шелъ черезъ гальванометръ. Именно онъ удержалъ стрѣлку прибора на нулѣ, подперевъ ее нѣкоторой задержкой, которая не мѣшала однако поворачиваться подвижной части гальванометра въ другую сторону. Если теперь при такихъ условіяхъ разомкнуть рубильникъ K (рис. 72), то токъ долженъ былъ бы прекратиться. Однако въ катушкѣ L

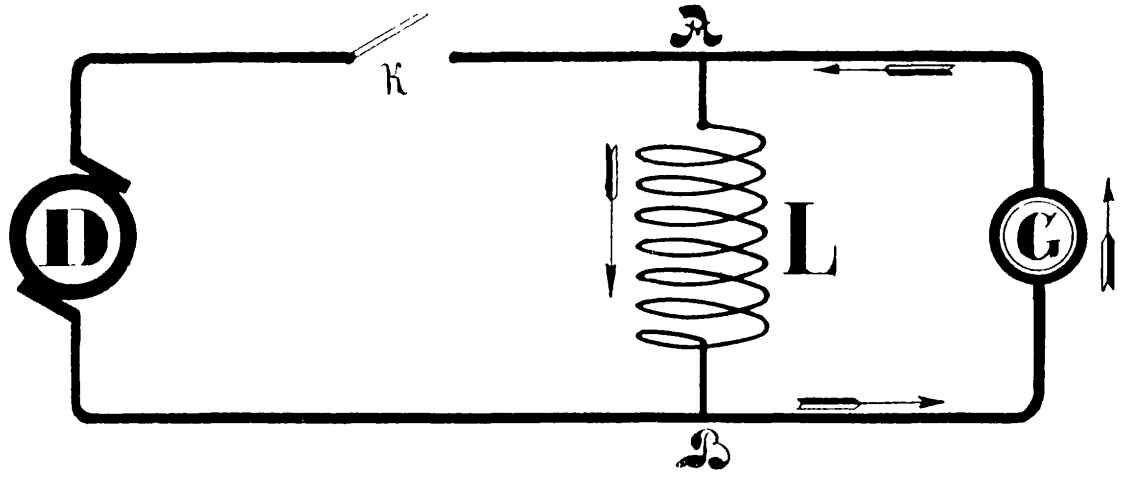


Рис. 72.

появится э.-д. сила самоиндукціи благодаря уменьшенію тока, и эта э.-д. сила будетъ стремиться поддержать токъ того же направленія въ катушкѣ. Такъ какъ рубильникъ K выключенъ, то этотъ токъ можетъ замкнуться только черезъ гальванометръ, но при этомъ онъ пройдетъ чрезъ него по направленію, обратно-

му тому, что было раньше, т. е. черезъ гальванометръ токъ потечетъ теперь въ направленіи отъ B къ A. Въ этомъ случаѣ задержка не будетъ препятствовать стрѣлкѣ гальванометра и она отклонится, свидѣтельствуя о томъ, что черезъ гальванометръ прошелъ токъ обратнаго направленія (рис. 72).

Нетрудно, исходя изъ соотношенія:

$$e = -L\frac{di}{dt},$$

видѣть, что вообще всегда, когда токъ уменьшается, э.-д. сила самоиндукціи стремится поддержать его; когда же токъ увеличивается, она стремится противодѣйствовать этому увеличенію. Дѣйствительно, въ первомъ случаѣ, при уменьшеніи тока, имѣемъ:

$$\frac{di}{dt} < 0,$$

и потому:

$$e > 0;$$

во второмъ же случаѣ, при возрастаніи тока, имѣемъ обратное:

$$\frac{di}{dt} > 0$$

и соотвѣтственно:

$$e < 0.$$

Однимъ словомъ э.-д. сила самоиндукціи всегда стремится противодѣйствовать измѣненію состоянія системы, состоящей изъ нѣкоторой цѣпи въ связи съ окружающей средой, въ которой и происходитъ существенная часть электрическаго процесса. Въ этомъ отношеніи явленія самоиндукціи вполнѣ укладываются въ рамки обобщеннаго закона Ленца, выражающаго собою, какъ мы указывали въ § 32, принципъ инерціи въ электромагнитныхъ системахъ. Электромагнитная инерція цѣпи электрическаго тока вполнѣ характеризуется коэффиціентомъ самоиндукціи L, который при этомъ играетъ ту же роль, какую играетъ масса во всякой матеріальной системѣ. Дѣйствительно, въ матеріальной системѣ всякому измѣненію ея состоянія противодѣйствуютъ такъ называемыя д'аламберовскія силы инерціи. Какъ извѣстно изъ теоретической механики, подобная сила въ случаѣ матеріальной точки, масса которой есть m, а скорость u, выражается такъ:

$$f = -m\frac{du}{dt}.$$

Если сравнить это выраженіе съ выраженіемъ:

$$e = -L\frac{di}{dt},$$

представляющимъ собою величину силы того же рода, что и д'аламберовская сила инерціи, но только электромагнитнаго характера, то мы увидимъ слѣдующее:

1) оба выраженія тождественны по формѣ,
2) коэффиціентъ самоиндукціи L играетъ ту же роль, что и коэффиціентъ инерціи матеріальной точки—ея массы m.
3) сила тока i играетъ роль скорости въ электрокинетическомъ процессѣ.

45. Флюксметръ.—Изъ всего того, что было сказано въ предыдущемъ § относительно самоиндукціи, ясно, что дѣйствіе ея всегда направлено къ сохраненію величины магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ данною цѣпью. Но даже и въ томъ случаѣ, когда въ цѣпи нѣтъ тока и потокъ, съ нею сцѣпляющійся, производится какимъ-либо постороннимъ дѣятелемъ, и тогда цѣпь стремится сохранить величину этого потока. Законъ электромагнитной индукціи или обобщенный законъ Ленца говоритъ намъ, что при всякой попыткѣ измѣненія внѣшняго потока, сцѣпляющагося съ замкнутою электрическою цѣпью, въ ней возникаютъ э.-д. сила и токъ, противодѣйствующіе этому измѣненію. Однимъ словомъ *все происходитъ такъ, какъ будто бы магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ нѣкоторою замкнутою электрическою цѣпью, стремится сохранить свою величину*. Какъ показалъ Максвелль, этотъ потокъ играетъ роль количества движенія въ электрокинетическомъ процессѣ. Въ случаѣ потока самоиндукціи мы имѣемъ:

$$\Phi = Li.$$

Въ случаѣ потока взаимной индукціи:

$$\Phi = Mi'.$$

Количество же движенія матеріальной точки выражается такъ:

$$p = mu.$$

Такимъ образомъ, мы видимъ, что магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ нѣкоторою электрическою цѣпью, независимо отъ того, есть ли это потокъ самоиндукціи или потокъ взаимной ин-

дукціи, формально выражается совершенно такъ же, какъ количество движенія въ матеріальной системѣ. Именно, въ обоихъ случаяхъ мы имѣемъ произведеніе коэффиціента инерціи (L, M, m) на скорость (i, u).

Согласно законамъ механики количество движенія въ матеріальной системѣ стремится сохранить свою величину. Совершенно тѣмъ же свойствомъ обладаетъ и количество, играющее ту же роль въ электрической системѣ.

Ко всему сказанному о стремленіи магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ нѣкоторою цѣпью, сохранить свою величину, должно прибавить еще слѣдующее. Къ сохраненію этого потока направлены не только возникающія въ системѣ э.-д. силы, но также и силы чисто механическаго характера. Въ этомъ можно убѣдиться изъ разсмотрѣнія схемы, представленной на рис. 73.

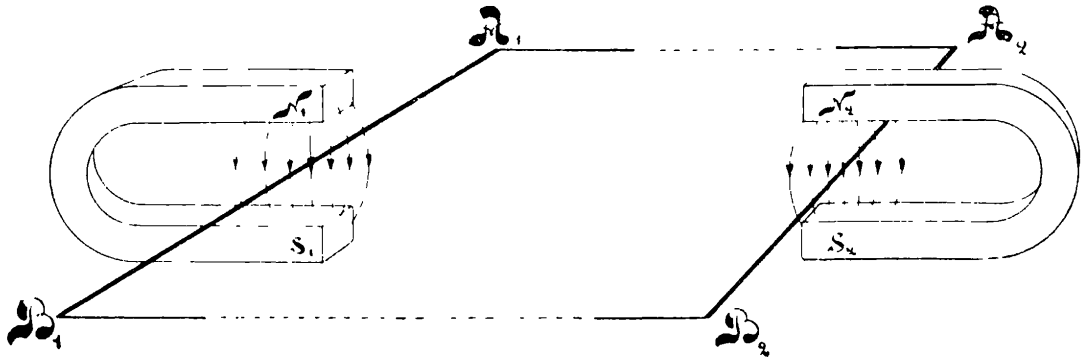


Рис. 73.

Здѣсь мы имѣемъ замкнутую цѣпь $A_1B_1B_2A_2$, состоящую изъ двухъ проводниковъ A_1B_1 и A_2B_2, которые соединены между собою гибкими проводниками A_1B_2 и B_1B_2. Эти послѣдніе, допустимъ, позволяютъ перемѣщать проводъ A_1B_1 въ полѣ магнита N_1S_1, не нарушая при этомъ неподвижности провода A_2B_2, въ свою очередь находящагося въ полѣ магнита N_2S_2. Предположимъ сначала, что провода A_1B_1 и A_2B_2 неподвижны. Магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ контуромъ $A_1B_1B_2A_2$, имѣетъ нѣкоторую совершенно опредѣленную величину, скажемъ Φ. Перемѣстимъ теперь проводъ A_1B_1, напримѣръ, вправо, пересѣкая магнитныя линіи магнита N_1S_1. При этомъ мы будемъ, очевидно, уменьшать потокъ Φ. Вмѣстѣ съ тѣмъ въ проводѣ A_1B_1 индуктируется э.-д. сила, направленная отъ B_1 къ A_1 (см. правило правой руки) и возбуждающая въ нашей замкнутой цѣпи токъ того же направленія. Слѣдовательно, во второмъ проводѣ токъ потечетъ въ направленіи отъ A_2 къ B_2. При этомъ возникнетъ электромагнитная сила,

которая будетъ стремиться двигать проводъ A_2B_2 вправо же (см. правило лѣвой руки). Но въ такомъ случаѣ проводъ A_2B_2 начнетъ перерѣзывать магнитныя линіи магнитнаго N_2S_2, входящія внутрь нашего контура и тѣмъ увеличивающія потокъ Φ. Такимъ образомъ, наша попытка измѣнить потокъ Φ, сцѣпляющійся съ данною цѣпью, путемъ перемѣщенія въ магнитномъ полѣ одной части этой цѣпи, встрѣчаетъ противодѣйствіе со стороны возникающихъ при этомъ механическихъ силъ, стремящихся возстановить убыль потока Φ путемъ соотвѣтствующаго передвиженія другой части цѣпи. И опытъ, и болѣе детальное теоретическое разсмотрѣніе вопроса показываютъ, что подобное возстановленіе убыли потока Φ можетъ быть совершенно полнымъ, если только при передвиженіи проводника A_2B_2 электромагнитной силѣ не приходится преодолѣвать сопротивленіе среды, а также силъ упругости соединительныхъ гибкихъ проводниковъ. При этихъ условіяхъ, слѣдовательно, всякое измѣненіе потока Φ, произошедшее въ одной части цѣпи, находитъ себѣ полную компенсацію въ другой части. Если мы, напримѣръ, пересѣчемъ проводомъ A_1B_1 10 000 максвеллей, то какъ разъ столько же максвеллей будетъ пересѣчено и подвижнымъ проводомъ A_2B_2. И если этотъ проводъ можетъ перемѣщаться вдоль какой-либо шкалы, дѣленія которой соотвѣтствуютъ опредѣленнымъ приращеніямъ потока Φ, то очевидно подобная комбинація можетъ служить въ качествѣ измѣрителя магнитныхъ потоковъ вообще. Дѣйствительно, стоитъ только охватить контуромъ нашей цѣпи измѣряемый потокъ, тотчасъ же по перемѣщенію подвижной части измѣрителя мы опредѣлимъ величину этого потока. Таковъ принципъ устройства спеціальнаго прибора, предназначеннаго для непосредственнаго измѣренія магнитныхъ потоковъ и потому называемаго *флюксметромъ* (отъ Flux — потокъ). Въ практическомъ осуществленіи приборъ этотъ напоминаетъ гальванометръ Депре-Д'Арсонваля (см. § 27). Подвижная катушка, подвѣшенная между полюсами постояннаго магнита, играетъ роль той части цѣпи, которая своимъ передвиженіемъ возстанавливаетъ величину магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ электрической цѣпи. Катушка эта подвѣшивается на тончайшей коконовой нити, крученіемъ которой можно совершенно пренебречь; токъ же подводится при посредствѣ двухъ тоже настолько тонкихъ металлическихъ ленточекъ, что направляющее дѣйствіе, вызываемое ихъ упругостью, практически неощутимо. Такимъ образомъ осуществля-

ются тѣ теоретическія условія, при которыхъ флюксметръ можетъ удовлетворительно работать. Отклоненія подвижной части прибора указываются особою стрѣлкою, прикрѣпленною къ катушкѣ и движущейся надъ шкалой съ дѣленіями.

46. Электродвижущая сила гальваническаго элемента.—До сихъ поръ мы имѣли дѣло лишь съ э.-д. силой индукціи. Но существуютъ еще и другія условія, при которыхъ возникаетъ э.-д. сила. Нѣкоторые изъ такихъ источниковъ э.-д. силы мы и укажемъ.

Какъ наиболѣе распространенный на практикѣ источникъ э.-д. силы, назовемъ прежде всего *гальваническій элементъ*. Онъ состоитъ изъ двухъ разнородныхъ проводниковъ, помѣщенныхъ въ жидкость, которую подбираютъ такимъ образомъ, чтобы она химически взаимодѣйствовала хотя бы съ однимъ изъ двухъ проводниковъ—*электродовъ*, какъ ихъ обыкновенно называютъ. Въ качествѣ электродовъ чаще всего берутъ цинкъ и мѣдь или цинкъ и уголь, а въ качествѣ жидкости — растворы разныхъ кислотъ или солей. Благодаря соприкосновенію разнородныхъ тѣлъ, входящихъ въ составъ гальваническаго элемента, въ немъ развивается э.-д. сила. При введеніи элемента черезъ посредство электродовъ въ какую либо замкнутую цѣпь, въ этой послѣдней возникаетъ электрическій токъ со всѣми присущими ему и отчасти уже изученными нами свойствами. Энергія, которую электрическій токъ разноситъ при этомъ по всѣмъ частямъ цѣпи, черпается изъ запаса химической энергіи элемента. Эта энергія освобождается при химическихъ взаимодѣйствіяхъ между электродами и жидкостью. Химическія же взаимодѣйствія, повидимому, являются и основной причиной возникновенія въ элементѣ э.-д. силы.

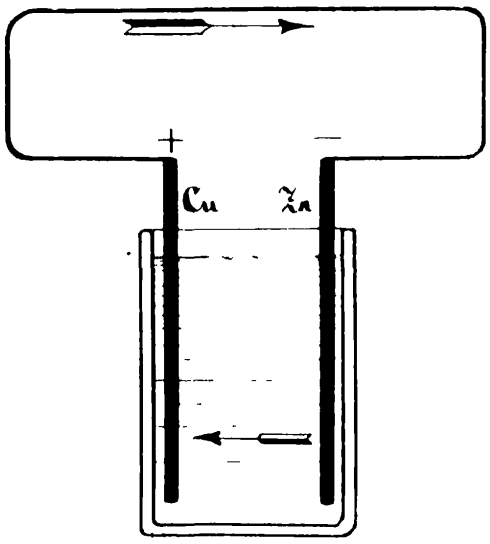


Рис. 74.

На рис. 74 представлена цѣпь со включеннымъ въ нее простѣйшимъ гальваническимъ элементомъ. Въ данномъ случаѣ онъ состоитъ изъ цинка (*Zn*) и мѣди (*Cu*), взятыхъ въ видѣ пластинокъ и погруженныхъ въ растворъ, напримѣръ, сѣрной кислоты. При этомъ въ цѣпи возбуждается токъ, который течетъ внутри элемента отъ цинка къ мѣди, а во внѣшней цѣпи — отъ мѣди къ цинку.

Обыкновенно тотъ электродъ или *полюсъ* элемента, отъ котораго токъ идетъ во внѣшнюю цѣпь, называютъ *положительнымъ* и обозначаютъ знакомъ (+), а полюсъ, къ которому онъ идетъ извнѣ, называютъ *отрицательнымъ* и обозначаютъ знакомъ (—). Во всѣхъ нормальныхъ типахъ элементовъ цинкъ служитъ отрицательнымъ полюсомъ.

На практикѣ часто пользуются такъ называемыми *вторичными элементами* или *аккумуляторами*. По идеѣ это тѣ же гальваническіе элементы, но они устроены такъ, что въ нихъ израсходованныя при химическихъ взаимодѣйствіяхъ вещества не нужно замѣнять новыми, какъ приходится дѣлать въ обычныхъ гальваническихъ элементахъ, а эти вещества возстанавливаются вновь дѣйствіемъ электрическаго тока, возбуждаемаго другимъ генераторомъ. Этотъ процессъ возстановленія называютъ *заряженіемъ аккумулятора*. Въ дальнѣйшемъ, въ главѣ объ электролизѣ, мы болѣе детально познакомимся съ характеромъ процессовъ, происходящихъ при заряженіи и разрядѣ аккумулятора.

47. Электродвижущая сила термоэлемента. — Опытъ показываетъ, что въ случаѣ замкнутой цѣпи, составленной изъ разнородныхъ твердыхъ проводниковъ, возникаетъ э.-д. сила и токъ, если только температуры мѣстъ соединенія этихъ проводниковъ другъ съ другомъ или, какъ говорятъ, температуры спаевъ неодинаковы. Пока температуры спаевъ тождественны, тока въ цѣпи при прочихъ равныхъ условіяхъ не наблюдается. Такимъ образомъ основной причиной появленія э.-д. силы и тока надо считать нѣкоторыя особенности теплового состоянія данной сложной цѣпи и потому э.-д. силу и токъ въ этомъ случаѣ принято называть *термоэлектродвижущей силой* и *термоэлектрическимъ токомъ*, а самую комбинацію разнородныхъ проводниковъ — *термоэлементомъ*. Разсмотримъ простѣйшую комбинацію этого рода — термоэлементъ, состоящій, напримѣръ, изъ мѣди и желѣза, спаянныхъ въ точкахъ A и B (рис. 75). Въ то время какъ спай B находится при температурѣ окружающей атмосферы, спай A нагрѣвается до болѣе высокой температуры при помощи соотвѣтствующаго приспособленія. Возникающій при этомъ въ цѣпи токъ проходитъ черезъ нагрѣтый спай по направленію отъ мѣди къ желѣзу. На этомъ основаніи говорятъ, что мѣдь *отрицательна* по отношенію къ желѣзу, а желѣзо *положительно* по отношенію къ мѣди.

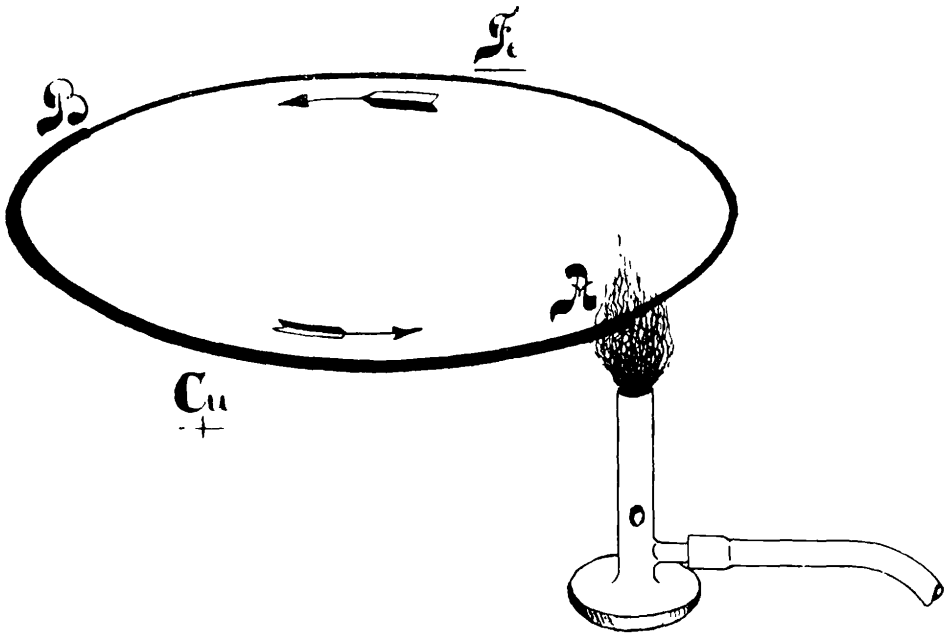


Рис. 75.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ каждый металлъ отрицателенъ по отношенію къ тѣмъ, которые за нимъ слѣдуютъ, и положителенъ относительно предшествующихъ:

Висмутъ	Марганецъ	Золото
Никкель	Серебро	Цинкъ
Платина	Олово	Желѣзо
Палладій	Свинецъ	Мышьякъ
Кобальтъ	Мѣдь	Сюрьма.

Термоэлектродвижущія силы всегда очень слабы. Тѣмъ не менѣе, такъ какъ сопротивленіе термоэлектрическихъ элементовъ или паръ, состоящихъ изъ однихъ металловъ, можетъ быть сдѣлано весьма малымъ, они могутъ давать сильные токи. Такъ элементъ висмутъ-мѣдь, нагрѣваемый у одного изъ спаевъ, сильно отклоняетъ магнитную стрѣлку, помѣщенную внутри элемента (рис. 76).

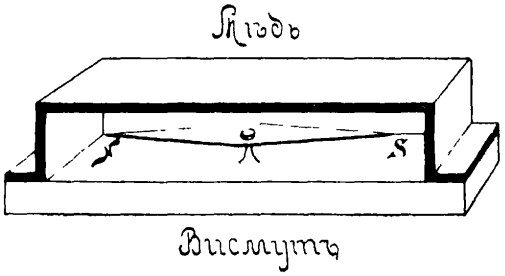


Рис. 76.

Такъ какъ многія термоэлектрическія пары въ извѣстныхъ предѣлахъ разности температуръ спаевъ даютъ э.-д. силу прямо-пропорціональную этой разности, то ихъ нерѣдко примѣняютъ на практикѣ для измѣренія температуръ. О величинѣ э.-д. силы судятъ обыкновенно по силѣ тока въ цѣпи, въ составъ которой для этой цѣли вводятъ чувствительный гальванометръ. Одинъ изъ спаевъ примѣняемой для измѣренія пары держатъ

при постоянной температурѣ, напримѣръ при температурѣ таянія льда, а другому сообщаютъ измѣряемую температуру. Ясно конечно, что гальванометръ долженъ быть сначала проградуированъ «на температуру». Для этого сообщаютъ нагрѣваемому спаю заранѣе извѣстную температуру и наблюдаютъ соотвѣтствующее отклоненіе гальванометра. Рядъ такихъ предварительныхъ наблюденій позволяетъ установить температурную цѣну каждаго дѣленія шкалы гальванометра.

48. Внѣшняя электродвижущая сила, дѣйствующая между концами участка электрической цѣпи. — Не ставя своею цѣлью въ этомъ курсѣ ознакомленіе со всѣми открытыми до настоящаго времени видами э.-д. силы, мы закончимъ нашъ перечень э.-д. силъ разсмотрѣніемъ одного общаго и весьма важнаго случая. Представимъ себѣ нѣкоторый проводникъ AB (рис. 77), входящій въ составъ замкнутой цѣпи, по которой идетъ электрическій токъ. Пусть токъ направленъ отъ A къ B. При этомъ

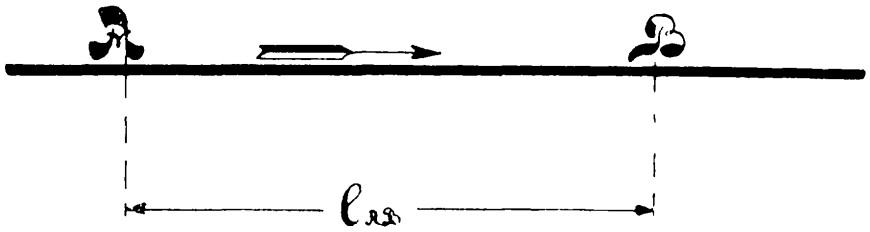


Рис. 77.

никакихъ источниковъ э.-д. силы мы не помѣщаемъ на участкѣ AB. Они вынесены наружу и находятся въ другихъ частяхъ цѣпи. Сосредоточимъ теперь наше вниманіе исключительно на участкѣ AB. Повторяемъ: между точками A и B не введено никакихъ источниковъ э.-д. силы. Тѣмъ не менѣе въ проводникѣ между этими точками протекаетъ нѣкоторый процессъ, опредѣленнымъ образомъ направленный. Этого не могло бы произойти, если бы точки A и B были въ абсолютно тождественныхъ условіяхъ, подобныхъ, напримѣръ, тѣмъ, въ которыхъ находятся концы отрѣзка проволоки, совершенно выдѣленнаго и не приходящаго ни съ чѣмъ въ соприкосновеніе. Слѣдовательно, въ случаѣ электрическаго тока, идущаго отъ точки A къ точкѣ B, мы должны допустить, что эти точки обладаютъ какими-то различными свойствами, что состоянія точекъ A и B не тождественны. Это различіе въ состояніяхъ точекъ A и B, очевидно, и является причиною существованія тока на участкѣ AB. Что это дѣйствительно такъ, въ этомъ

нетрудно убѣдиться изъ непосредственнаго опыта. Возьмемъ, напримѣръ, и изогнемъ проводникъ AB такъ, чтобы точка A пришла въ соприкосновеніе съ точкою B. Тѣсное сближеніе этихъ точекъ повлечетъ за собою уравненіе ихъ состояній и въ то же время токъ на участкѣ AB прекратится. Итакъ, различіе въ состояніяхъ точекъ A и B представляетъ собою э.-д. силу, дѣйствующую на участкѣ AB. Обозначимъ ее черезъ e_{AB}. Конечно эта э.-д. сила e_{AB} сама по себѣ немыслима. Она есть результатъ существованія основной э. д. силы, источникъ которой—динамомашина, гальваническій элементъ и т. п.—находится гдѣ-нибудь въ другой части цѣпи. Все происходитъ такъ, какъ будто бы основная э.-д. сила, дѣйствующая въ нашей замкнутой цѣпи, разбивается на отдѣльныя части, каждая изъ которыхъ служитъ для преодолѣнія сопротивленій отдѣльныхъ участковъ цѣпи; однимъ изъ нихъ является и разсматриваемый участокъ AB. Въ этомъ смыслѣ можно считать э.-д. силу e_{AB} частью основной э.-д. силы. Мы видимъ такимъ образомъ, что e_{AB} представляетъ собою, собственно говоря, *внѣшнюю электродвижущую силу, дѣйствующую между точками A и B.*

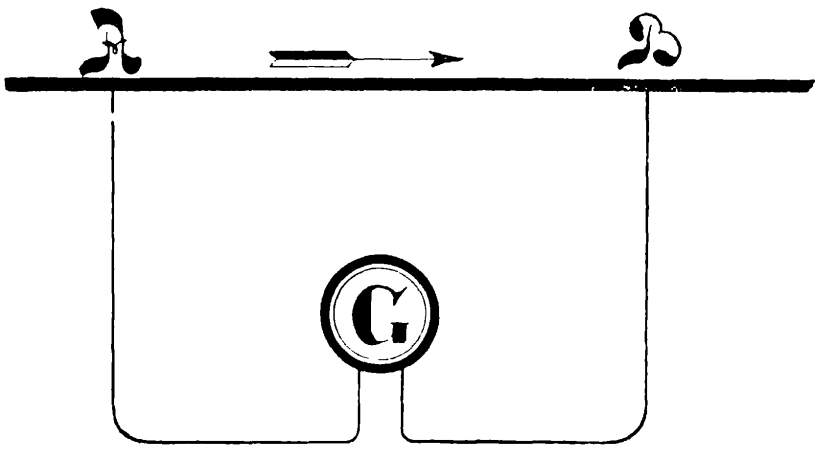


Рис. 78.

Съ внѣшнею э.-д. силой не слѣдуетъ смѣшивать тѣхъ *внутреннихъ электродвижущихъ силъ*, которыя могли бы оказаться въ предѣлахъ разсматриваемаго участка цѣпи, если бы мы ввели сюда, напримѣръ, динамомашину или гальваническій элементъ.

Можно слѣдующимъ опытомъ убѣдиться въ томъ, что между точками A и B нашей электрической цѣпи дѣйствуетъ э.-д. сила e_{AB}. Не мѣняя ничего въ системѣ, приключимъ къ точкамъ A и B проводникъ съ гальванометромъ G (рис. 78). При этомъ черезъ гальванометръ пройдетъ токъ, что мы обнаружимъ по отклоненію гальванометра. Такимъ образомъ э.-д. сила e_{AB} проявляется въ возбужденіи электрическаго тока не только въ участкѣ AB нашей цѣпи, но и въ любой параллельной вѣтви, приключенной къ точкамъ A и B.

Съ цѣлью лучшаго уясненія всего сказаннаго объ э.-д. силѣ e_{AB} полезно остановиться на одной аналогіи. Вообразимъ себѣ нѣкоторый замкнутый трубопроводъ, по которому циркулируетъ какая-либо жидкость (напр. вода) благодаря дѣйствію насоса. Выдѣлимъ нѣкоторый участокъ AB этого трубопровода (рис. 79). Ясно конечно, что основной причиной, возбуждающей теченіе жидкости, является дѣйствіе насоса, находящагося внѣ участка AB. Но отвлекаясь отъ всей системы и разсматривая только этотъ участокъ, мы должны сказать, что теченіе жидкости между точками A и B обусловливается нѣкоторою причиной,

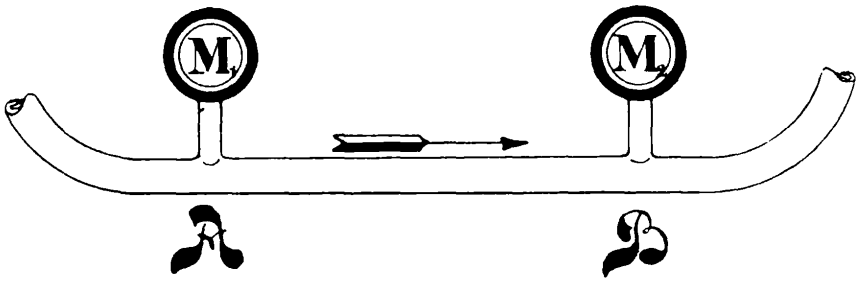


Рис. 79.

дѣйствующей именно на этомъ участкѣ. Причина эта есть разность состояній точекъ A и B, именно разность давленій въ этихъ точкахъ, въ существованіи которой легко убѣдиться при помощи манометровъ M_1 и M_2, присоединяемыхъ для этой цѣли къ трубѣ въ точкахъ A и B. Эта разность давленій представляетъ собою часть полнаго давленія, развиваемаго насосомъ,— часть, идущую на преодолѣніе сопротивленія участка AB. Итакъ, въ этой гидродинамической аналогіи разность давленій между точками A и B—«вододвижущая» сила между этими точками—соотвѣтствуетъ внѣшней э.-д. силѣ между точками A и B въ цѣпи тока (рис. 77 и 78).

ГЛАВА ПЯТАЯ.

Работа электрическаго тока.

49. Выводъ основного выраженія для работы тока.—Представимъ себѣ электрическую цѣпь $ABCD$ (рис. 80), которая подъ дѣйствіемъ внѣшней механической силы f' движется съ постоянною скоростью u такимъ образомъ, что прямолинейный участокъ этой цѣпи AB перерѣзываетъ однородное магнитное поле, исходящее, напримѣръ, изъ сѣвернаго полюса нѣкотораго магнита.

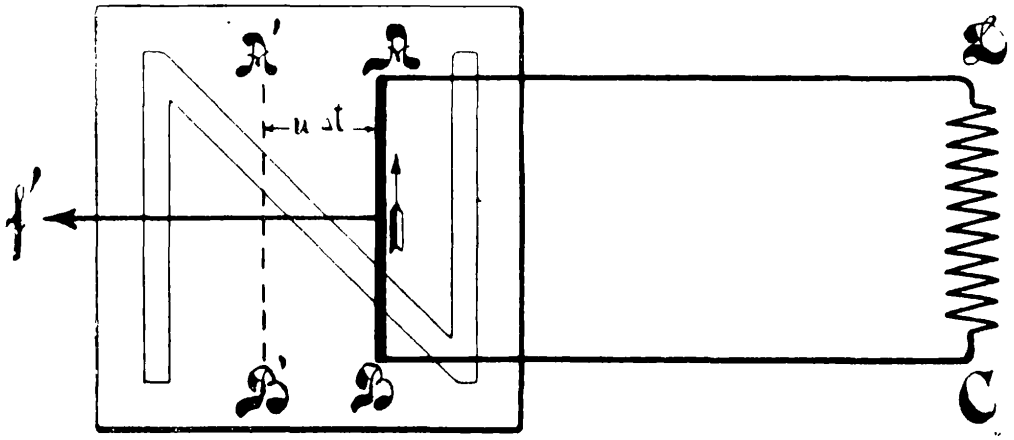


Рис. 80.

Допустимъ далѣе, что участокъ цѣпи AB, направленіе однороднаго поля и направленіе движенія или направленіе внѣшней механической силы f' взаимно перпендикулярны. Ясно, конечно, что въ проводникѣ AB будетъ индуктироваться э.-д. с., которая въ настоящемъ случаѣ и является причиною возникновенія въ цѣпи тока. При этомъ направленіе э.-д. силы и тока будетъ отъ B къ A (см. правило Сильвануса Томпсона). Такъ какъ магнитное поле однородно и кромѣ того:

$$u = \text{const.},$$

то очевидно э.-д. с. и сила тока должны быть постоянны.

Разсмотримъ теперь работу того внѣшняго дѣятеля, который развиваетъ силу f', приводящую нашу цѣпь въ движеніе, и благодаря которому возникаетъ въ цѣпи электрическій токъ. Предположимъ, что въ разсматриваемомъ случаѣ среда не оказываетъ никакого сопротивленія движенію. Въ такомъ случаѣ вся сила f' идетъ на преодолѣніе противодѣйствующей движенію электромагнитной силы f, которая будетъ направлена обратно силѣ f', т. е. слѣва направо. Между этими силами, очевидно, должно существовать такое соотношеніе:

$$f' = -f.$$

Если B есть магнитная индукція въ нашемъ однородномъ полѣ, l—длина участка AB, а i—сила постояннаго тока, то величина электромагнитной силы выразится такъ (см. § 34):

$$f = Bli$$

и слѣдовательно:

$$f' = -Bli.$$

Обозначимъ работу внѣшняго дѣятеля за элементарный промежутокъ времени Δt черезъ ΔA. За это время проводникъ AB перемѣстится въ положеніе $A'B'$ и величина перемѣщенія будетъ $u \cdot \Delta t$. Въ виду этого можемъ написать:

$$\begin{aligned} \Delta A &= f' \cdot u \cdot \Delta t = \\ &= -Bliu \cdot \Delta t = \\ &= (-Blu) \cdot i \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Произведеніе трехъ множителей, выдѣленное въ скобки, имѣетъ вполнѣ опредѣленный физическій смыслъ. Дѣйствительно, lu есть поверхность, которая была бы образована движеніемъ проводника AB въ теченіе одной секунды, а Blu представляетъ собою магнитный потокъ, который былъ бы пересѣченъ проводникомъ AB за то же время. Такъ какъ кромѣ того:

$$u = \text{const},$$

то Blu есть скорость равномѣрнаго пересѣченія магнитнаго потока проводникомъ AB, и мы можемъ написать:

$$\frac{d\Phi}{dt} = Blu.$$

Слѣдовательно:

$$\begin{aligned} -Blu &= -\frac{d\Phi}{dt} = \\ &= e; \end{aligned}$$

другими словами, выраженіе, выдѣленное въ скобки, представляетъ собой э.-д. силу. Такимъ образомъ, соотношеніе для работы внѣшняго дѣятеля принимаетъ видъ:

$$\Delta A = ei \cdot \Delta t.$$

Въ случаѣ постоянныхъ э.-д. силы и тока, для любого промежутка времени можемъ написать:

$$A = eit.$$

Такъ выражается работа внѣшняго дѣятеля, работа, пошедшая исключительно на созданіе электрическаго тока, ибо при этомъ никакихъ сопротивленій матеріальнаго характера не приходилось преодолѣвать. Слѣдовательно, эта работа должна была цѣликомъ превратиться въ энергію электрическаго тока, за счетъ которой токъ совершаетъ въ цѣпи разнаго рода работу: нагрѣваніе проводниковъ, вращеніе включенныхъ въ цѣпь электродвигателей и т. п.

Итакъ, *работа электрическаго тока выражается произведеніемъ электродвижущей силы, силы тока и времени.*

Въ случаѣ постоянныхъ э.-д. силы и тока мы за любой промежутокъ времени выражаемъ работу тока слѣдующимъ образомъ:

$$A = eit.$$

Въ случаѣ же какъ угодно измѣняющихся э.-д. силы и тока мы можемъ написать аналогичное соотношеніе для безконечно малаго промежутка времени:

$$dA = ei \cdot dt.$$

50. Единицы работы тока.—Если мы будемъ измѣрять э.-д. силу, силу тока и время въ абсолютныхъ единицахъ, то очевидно работа тока выразится въ эргахъ. Если же э.-д. сила и токъ измѣряются практическими электромагнитными единицами, то для того, чтобы работа тока опять же выразилась въ эргахъ, надо имѣть въ виду слѣдующія соотношенія:

$$1 \text{ вольтъ} = 10^8 \text{ абс. эл.-маги. ед.}$$
$$1 \text{ амперъ} = 10^{-1} \text{ абс. эл.-маги. ед.}$$

Слѣдовательно имѣемъ:

$$A = (e \cdot 10^8) \cdot (i \cdot 10^{-1}) \cdot t =$$
$$= eit \cdot 10^7 \text{ эрговъ.}$$

За практическую единицу работы тока принимаютъ какъ разъ 10^7 эрговъ и называютъ ее *джулемъ*. Такимъ образомъ:

$$A = eit \text{ джулей.}$$

Если положимъ:

$e = 1$ вольту,
$i = 1$ амперу,
$t = 1$ секундѣ,

то получаемъ:

$$A = 1 \text{ джулю.}$$

Итакъ, *джуль есть работа электрическаго тока за время, равное одной секундѣ, при электродвижущей силѣ въ одинъ вольтъ и при силѣ тока въ одинъ амперъ.*

Въ виду этого можно сказать, что джуль есть вольтъ-амперъ-секунда.

Джуль составляетъ около 0,102 килограмметра.

51. Второе опредѣленіе единицы электродвижущей силы.—Въ выраженіи для работы тока произведеніе it представляетъ собою не что иное, какъ количество электричества, протекшее по цѣпи за время совершенія работы. Обозначая это количество электричества черезъ q, можемъ слѣдовательно написать:

$$q = it.$$

Произведя соотвѣтствующую замѣну въ выраженіи для работы тока, получаемъ:

$$A = eq,$$

т. е. *работа электрическаго тока выражается произведеніемъ электродвижущей силы на количество электричества, протекшее по цѣпи за время совершенія работы.*

На основаніи этого имѣемъ:

$$e = \frac{A}{q}.$$

Такимъ образомъ, *электродвижущая сила, дѣйствующая въ нѣкоторой цѣпи, измѣряется производимою ею работой за время прохожденія по цѣпи единицы количества электричества.*

И если положимъ что:

$$A = 1 \text{ джулю},$$
$$q = 1 \text{ кулону},$$

то очевидно:

$$e = 1 \text{ вольту}.$$

Итакъ, *вольтъ есть электродвижущая сила, совершающая работу въ одинъ джуль при прохожденіи по цѣпи одного кулона электричества.*

Это второе опредѣленіе единицы э.-д. силы (ср. § 42) болѣе обще въ томъ смыслѣ, что въ основаніе его положено явленіе, имѣющее мѣсто совершенно независимо отъ того, какова природа э.-д. силы, и потому оно можетъ оказаться полезнымъ при изслѣдованіи э.-д. силъ иныхъ, чѣмъ э.-д. сила индукціи.

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

Разность потенціаловъ (Напряженіе).

---

52. Потенціалъ.—Примѣнимъ результаты, къ которымъ мы пришли въ предыдущемъ §, къ изслѣдованію внѣшней э.-д. силы, дѣйствующей на нѣкоторомъ участкѣ электрической цѣпи. Очевидно, эта э.-д. сила измѣряется тою работой, которую она производитъ на данномъ участкѣ при прохожденіи по цѣпи одного кулона электричества.

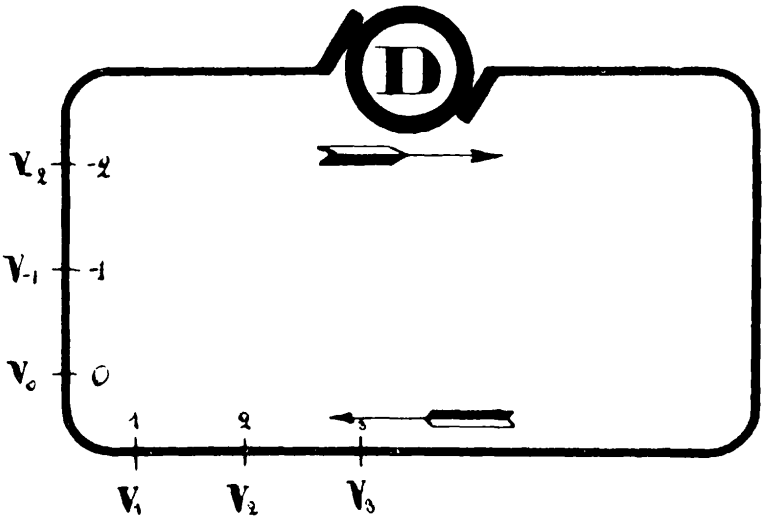


Рис. 81.

Представимъ себѣ теперь нѣкоторую замкнутую цѣпь (рис. 81), въ которой возбуждается токъ динамомашиною D, напримѣръ. Допустимъ при этомъ, что никакихъ другихъ основныхъ э.-д. силъ въ цѣпь не включено и что, слѣдовательно, э.-д. сила, дѣйствующая на каждомъ отдѣльномъ участкѣ цѣпи внѣ динамомашины, есть внѣшняя э.-д. сила. Допустимъ далѣе, что токъ течетъ въ направленіи, показанномъ стрѣлками, т. е. послѣдовательно протекаетъ черезъ точки, обозначенныя знаками 3, 2, 1, 0, —1, —2. Какъ было выяснено въ § 48, внѣшнюю э.-д. силу, дѣйствующую между любыми двумя этими точками, можно представить себѣ въ видѣ разности состояній данныхъ точекъ. Повторяемъ, здѣсь играетъ роль разность состояній, а не абсолютныя вели-

чины, которыми мы могли бы характеризовать эти состоянія. Такъ какъ къ тому же мы не имѣемъ никакихъ основаній, чтобы судить объ абсолютныхъ размѣрахъ этихъ величинъ, то обыкновенно принимаютъ совершенно условно, что состояніе нѣкоторой опредѣленной точки характеризуется нулемъ. Пусть въ нашемъ случаѣ точка O будетъ такой нулевой точкой. Будемъ теперь сравнивать съ нею состоянія другихъ точекъ электрической цѣпи; другими словами, будемъ разсматривать внѣшнія э.-д. силы на участкахъ (3, 0), (2, 0) и т. д. Сохраняя обозначенія § 48, можемъ написать:

$$e_{3,0} = \frac{A_{3,0}}{q}.$$

Послѣднее отношеніе называется *потенціаломъ точки 3* и обозначается знакомъ V_3. Такимъ образомъ имѣемъ:

$$e_{3,0} = \frac{A_{3,0}}{q} = V_3$$

Потенціаломъ точки 3, слѣдовательно, характеризуется величина э.-д. силы между этой точкой и точкой нулевой. Его же можно разсматривать и какъ характеристику состоянія точки 3. Аналогичныя соотношенія можемъ написать и для другихъ точекъ:

$$e_{2,0} = \frac{A_{2,0}}{q} = V_2$$

$$e_{1,0} = \frac{A_{1,0}}{q} = V_1$$

и т. д.

Ясно, что величина потенціала нѣкоторой точки будетъ становиться все меньше и меньше по мѣрѣ приближенія этой точки къ нулевой точкѣ O, ибо при этомъ должна становиться все меньше и меньше работа A. Въ предѣлѣ, когда эти точки сольются, потенціалъ сдѣлается равнымъ нулю, ибо работа на участкѣ, длина котораго есть нуль, должна быть также равна нулю. Слѣдовательно:

$$V_0 = 0,$$

т. е. потенціалъ нулевой точки есть нуль и, собственно говоря, то условіе, которое мы дѣлаемъ относительно точки O, заключается именно въ томъ, что мы принимаемъ ея потенціалъ равнымъ нулю.

Итакъ, *потенціалъ нѣкоторой точки равенъ работѣ, совершаемой внѣшней электродвижущей силой при переходѣ единицы количества электричества на участкѣ отъ данной точки до другой, потенціалъ которой условно принятъ равнымъ нулю.*

53. Разность потенціаловъ (напряженіе).—Продолжая изслѣдованіе цѣпи, представленной на рисункѣ 81, мы можемъ написать, напримѣръ, для участка (3,1):

$$e_{3,1} = \frac{A_{3,1}}{q} = \frac{A_{3,0} - A_{1,0}}{q} = \frac{A_{3,0}}{q} - \frac{A_{1,0}}{q},$$

такъ какъ, очевидно, работа э.-д. силы на участкѣ (3,1) будетъ разностью работъ на участкахъ (3,0) и (1,0). На основаніи предыдущаго:

$$\frac{A_{3,0}}{q} = V_3$$

и

$$\frac{A_{1,0}}{q} = V_1.$$

Слѣдовательно:

$$e_{3,1} = V_3 - V_1,$$

т. е. *внѣшняя электродвижущая сила на участкѣ цѣпи между какими-нибудь двумя точками равна разности потенціаловъ между этими точками.*

Въ то же время изъ предыдущаго вытекаетъ, что *разность потенціаловъ между двумя точками представляетъ собою работу, совершаемую внѣшнею электродвижущей силой при переходѣ единицы количества электричества отъ одной точки до другой.*

Въ виду тождественности понятій: «внѣшняя э.-д. сила на участкѣ цѣпи между двумя точками» и «разность потенціаловъ между двумя точками», практически весьма часто пользуются терминомъ «разность потенціаловъ», выражая конечно ее въ тѣхъ же единицахъ, что и э.-д. силу, т. е. въ вольтахъ. Такимъ образомъ, *разность потенціаловъ между двумя точками равна одному вольту, если внѣшняя электродвижущая сила со-*

вершаетъ работу въ одинъ джуль при перенесеніи одного кулона электричества отъ одной точки до другой.

Иногда разность потенціаловъ между двумя точками называютъ *напряженіемъ* между этими точками.

Обращаясь опять къ схемѣ, представленной на рисункѣ 81, мы можемъ написать слѣдующій рядъ соотношеній, вытекающихъ изъ всего предыдущаго:

$$V_3 > V_2$$
$$V_2 > V_1$$
$$V_1 > V_0$$
$$V_0 > V_{-1}$$
$$V_{-1} > V_{-2}$$

и т. д.

Такъ какъ при этомъ:

$$V_0 = 0,$$

то слѣдовательно:

$$V_3 > 0$$
$$V_2 > 0$$
$$V_1 > 0$$

и въ то же время:

$$V_{-1} < 0$$
$$V_{-2} < 0$$

Изъ этихъ соотношеній вытекаетъ прежде всего, что, *если на данномъ участкѣ цѣпи отсутствуютъ какія либо внутреннія э.-д. силы, то электрическій токъ всегда течетъ отъ мѣстъ высшаго потенціала къ мѣстамъ низшаго.*

Далѣе мы видимъ, что потенціалъ точки можетъ быть какъ положительнымъ, такъ и отрицательнымъ. Потенціалъ точки будетъ положительнымъ, если при отсутствіи внутреннихъ э.-д. силъ токъ течетъ отъ данной точки къ точкѣ нулевого потенціала, и обратно потенціалъ точки отрицателенъ, если при тѣхъ же условіяхъ токъ течетъ отъ точки нулевого потенціала къ данной точкѣ.

54. Измѣреніе разности потенціаловъ. Вольтметръ.— Такъ какъ разность потенціаловъ обычно выражаютъ въ вольтахъ, то приборы, предназначенные для измѣренія ея, называются *вольтметрами.* Наиболѣе распространенный методъ, примѣняемый при измѣреніяхъ подобнаго рода, состоитъ въ слѣдующемъ. Между двумя точками электрической цѣпи, разность потенціа-

ловъ которыхъ желаютъ опредѣлить, напримѣръ между точками A и B, включаютъ параллельно главной цѣпи отвѣтвленіе (рис. 82). При этомъ электрическое сопротивленіе отвѣтвленія дѣлаютъ по возможности бо́льшимъ съ тою цѣлью, чтобы по нему могъ при данныхъ условіяхъ пройти сравнительно ничтожный по силѣ токъ и чтобы такимъ образомъ присоединеніе этого отвѣтвленія не измѣнило замѣтно общихъ условій въ нашей главной цѣпи. Благодаря этому измѣряемая разность потенціаловъ $V_A - V_B$ практически остается тою же послѣ присоединенія отвѣтвленія, какъ и до того.

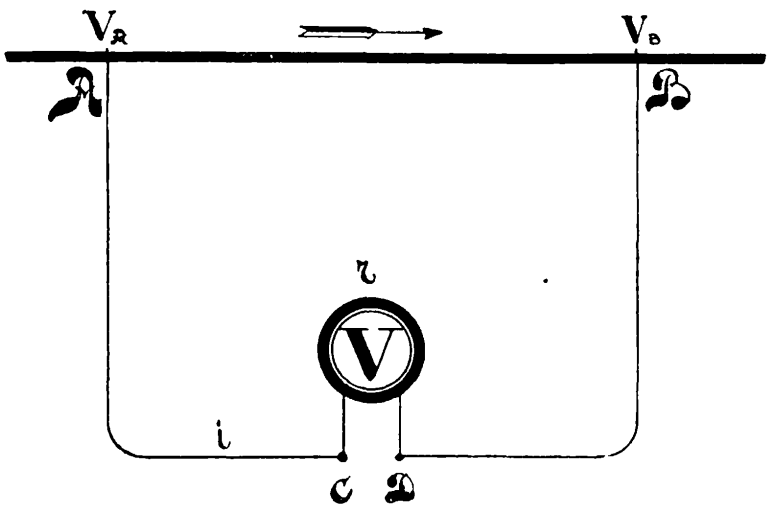


Рис. 82.

Если теперь обозначимъ черезъ i силу тока въ отвѣтвленіи, а черезъ r—его электрическое сопротивленіе, то на основаніи закона Ома, который очевидно долженъ быть справедливъ и въ настоящемъ случаѣ, можемъ написать:

$$i = \frac{e_{AB}}{r} = \frac{V_A - V_B}{r}$$

Отсюда имѣемъ:

$$V_A - V_B = ri,$$

т. е. при неизмѣнномъ сопротивленіи r разность потенціаловъ между точками A и B прямо-пропорціональна силѣ тока, протекающаго черезъ отвѣтвленіе. Если, слѣдовательно, помѣстить въ этомъ отвѣтвленіи чувствительный приборъ типа гальванометра, то его отклоненія, позволяющія судить о силѣ протекающаго черезъ него тока, дадутъ возможность судить также и о величинѣ разности потенціаловъ между точками A и B. И если только шкала прибора предварительно проградуирована такъ, чтобы дѣленія ея строго соотвѣтствовали опредѣленнымъ разностямъ потенціаловъ, мы и получаемъ вольтметръ. На рисункѣ 82 онъ обозначенъ буквою V. Обычно всѣ вольт-

метры, служащіе для измѣреній по описанному методу, строются въ общемъ такъ же, какъ и амперметры, но только при этомъ принимаются спеціальныя мѣры къ тому, чтобы электрическое сопротивленіе прибора было достаточно велико. Весьма распространены, напримѣръ, вольтметры типа, изображеннаго схематически на рисункѣ 60, т. е. типа гальванометра Депре-д'Арсонваля. Такъ какъ обыкновенно оказывается, что сопротивленіе обмотки прибора сравнительно невелико, то приходится присоединять къ нему добавочное сопротивленіе, состоящее изъ тонкой изолированной проволоки, намотанной на катушки или на особую неподвижную раму. Въ огромномъ большинствѣ случаевъ это добавочное сопротивленіе по размѣрамъ невелико; поэтому его принято помѣщать внутри самого прибора, и тогда зажимы вольтметра (*C* и *D* на рис. 82) присоединяютъ къ двумъ изслѣдуемымъ точкамъ цѣпи при помощи проводниковъ, сопротивленіемъ которыхъ можно пренебречь.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

Мощность электрическаго тока.

---

55. Выводъ выраженія для мощности тока.—Мощность вообще представляетъ собою скорость совершенія работы и, въ частномъ случаѣ, мощность электрическаго тока есть скорость, съ которою токъ совершаетъ въ цѣпи разнаго рода работу. Слѣдовательно, мощность тока измѣряется работою, совершаемою въ одну секунду, при условіи, конечно, неизмѣняемости общихъ условій. Такимъ образомъ въ случаѣ постояннаго тока, когда работа выражается соотношеніемъ:

$$A = eit,$$

получаемъ, обозначая мощность черезъ W:

$$W = \frac{A}{t} = ei.$$

Такое же выраженіе для мощности мы получаемъ и въ самомъ общемъ случаѣ, когда и э.-д. сила, и токъ измѣняются по какому угодно закону. Дѣйствительно, въ этомъ случаѣ работа тока за безконечно малый промежутокъ времени равна:

$$dA = ei \cdot dt.$$

Отсюда имѣемъ, согласно опредѣленію:

$$W = \frac{dA}{dt} = ei.$$

Итакъ, *мощность электрическаго тока выражается произведеніемъ электродвижущей силы и силы тока.*

Примѣняя соотношенія для работы и мощности тока къ участку цѣпи, по которому течетъ токъ i подъ вліяніемъ разности потенціаловъ $V_1 - V_2$, можно написать:

$$A = eit = \\ = (V_1 - V_2)\, it;$$
$$W = ei = \\ = (V_1 - V_2)\, i.$$

56. Единицы мощности тока и связанныя съ ними единицы работы.—Если мы будемъ выражать э.-д. силу и силу тока въ абсолютныхъ электромагнитныхъ единицахъ, то очевидно получимъ мощность тока, выраженную въ единицахъ системы *CGS*, т. е. въ эргахъ въ секунду. Если же воспользуемся для измѣренія э.-д. силы и тока практическими единицами—вольтомъ и амперомъ, то можемъ написать (см. § 50):

$$W = \frac{A}{t} = \\ = e.\, i.\, 10^7 \frac{\text{эргъ}}{\text{сек.}} = \\ = ei \frac{\text{джуль}}{\text{сек.}}.$$

Такимъ образомъ въ этомъ случаѣ мощность выражается въ джуляхъ въ секунду. Въ системѣ практическихъ электромагнитныхъ единицъ мощность равная одному джулю въ секунду называется *ваттомъ*. Слѣдовательно имѣемъ:

$$W = ei \text{ ваттовъ}.$$

Полагая:

$$e = 1 \text{ вольту},$$
$$i = 1 \text{ амперу},$$

получаемъ:

$$W = 1 \text{ ватту},$$

т. е. *ваттъ есть мощность тока въ одинъ амперъ при электродвижущей силѣ въ одинъ вольтъ*.

Исходя изъ основного соотношенія между работой и мощностью:

$$A = W \cdot t,$$

можно сказать, что джуль есть ваттъ-секунда.

Такъ какъ:

$$1 \text{ джуль} = 0{,}102 \text{ килограммметра},$$

то:

$$1 \text{ ваттъ} = 0{,}102 \frac{\text{килограммметръ}}{\text{секунда}}.$$

Такъ какъ, кромѣ того, лошадиная сила представляетъ собою мощность равную 75 килограммметрамъ въ секунду, то слѣдовательно:

$$1 \text{ л. с.} = \frac{75}{0{,}102} = 736 \text{ ваттамъ}.$$

Въ электротехнической промышленности кромѣ ватта часто примѣняются еще слѣдующія единицы мощности:

гектоваттъ = 100 ваттамъ,
киловаттъ = 1000 ваттамъ.

Принимая за единицу времени часъ, получаемъ слѣдующія производныя единицы работы:

гектоваттъ-часъ,
киловаттъ-часъ.

Ясно конечно, что:

1 киловаттъ-часъ = 3 600 000 джулей.

57. Измѣреніе мощности тока. Ваттметръ. —Для измѣренія мощности, поглощаемой нѣкоторою частью электрической цѣпи, напримѣръ тѣмъ или инымъ пріемникомъ электрической энергіи, примѣняются приборы, называемые *ваттметрами*. На рисункѣ 83

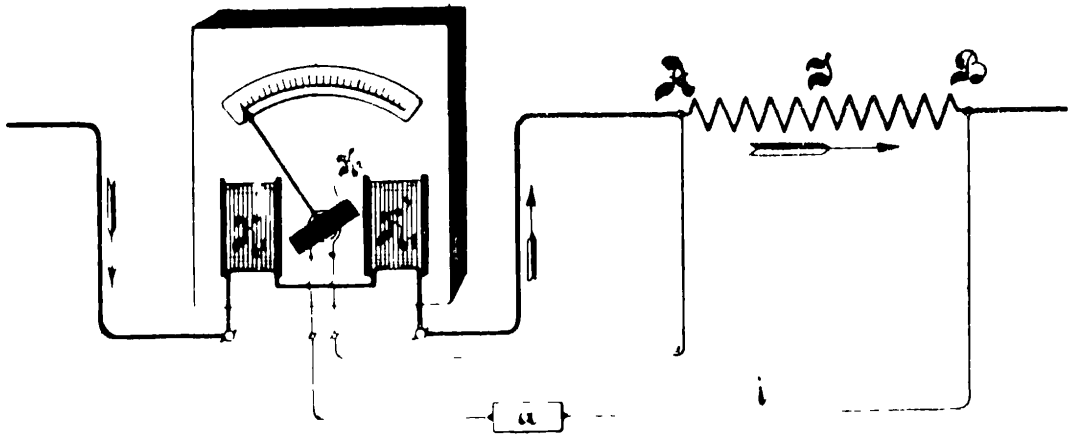


Рис. 83.

показаны схематически устройство ваттметра и способъ присоединенія его къ пріемнику. Допустимъ, что A и B представляютъ собою зажимы пріемника, въ которомъ расходуется электрическая мощность, подлежащая измѣренію. Послѣдова-

тельно съ этимъ пріемникомъ включается въ цѣпь неподвижная обмотка ваттметра, состоящая изъ катушки, раздѣляемой обыкновенно по чисто конструктивнымъ соображеніямъ на двѣ части K_1 и K_1'. По этой катушкѣ, слѣдовательно, проходитъ полностью токъ I, питающій пріемникъ AB. Такимъ образомъ внутри неподвижной катушки создается магнитное поле. Въ этомъ полѣ помѣщается подвижная катушка K_2, состоящая изъ большого числа витковъ тонкой изолированной проволоки. Въ общемъ катушка K_2 устроена и удерживается въ пространствѣ совершенно подобно подвижной катушкѣ амперметра типа Депре-Д'Арсонваля (см. § 36). Только въ случаѣ ваттметра отсутствуютъ какія бы то ни было желѣзныя части. Подвижная катушка K_2 приключается къ зажимамъ пріемника, точкамъ A и B, т. е. такъ же, какъ если бы эта катушка представляла собою вольтметръ. Такъ какъ сопротивленіе ея невелико, то обычно въ цѣпь отвѣтвленія вводятъ еще добавочное сопротивленіе a, благодаря которому токъ въ отвѣтвленіи, обозначимъ силу его черезъ i, ничтожно малъ по сравненію съ токомъ I, протекающимъ черезъ пріемникъ. Цѣль этого та же, что и въ случаѣ вольтметра. Въ виду малости тока i можно принять съ достаточною для практики точностью, что полная сила тока, протекающаго черезъ неподвижную катушку K_1K_1', есть какъ разъ I. Въ такомъ случаѣ можно сказать, что сила магнитнаго поля внутри неподвижной катушки прямо-пропорціональна силѣ тока I. Слѣдовательно, электромагнитныя силы, съ которыми взаимодѣйствуютъ катушки съ токами I и i, должны быть прямопропорціональны произведенію этихъ силъ токовъ. Обозначая моментъ электромагнитной пары силъ, стремящихся повернуть катушку K_2, черезъ p, можемъ написать:

$$p = c_1 I i,$$

гдѣ c_1 есть нѣкоторый коэффиціентъ пропорціональности, зависящій отъ геометрическихъ размѣровъ катушекъ и ихъ взаимнаго расположенія. Въ то же время, согласно закону Ома, можемъ слѣдующимъ образомъ выразить силу тока i:

$$i = \frac{V_1 - V_B}{r},$$

гдѣ r есть полное сопротивленіе отвѣтвленія, приключеннаго къ

точкамъ A и B. Подставляя это въ выраженіе для момента, получаемъ:

$$p = c_1 \, I \frac{V_A - V_B}{r} =$$

$$= \frac{c_1}{r} I \, (V_A - V_B).$$

Принимая затѣмъ во вниманіе, что:

$$I \, (V_A - V_B) = W,$$

имѣемъ:

$$p = \frac{c_1}{r} W.$$

Отсюда:

$$W = \frac{r}{c_1} p =$$

$$= c_2 \, p.$$

Такимъ образомъ, мощность, поглощаемая въ пріемникѣ AB, вполнѣ опредѣляется величиною момента пары силъ, выводящихъ изъ нормальнаго положенія подвижную часть ваттметра. Но этотъ моментъ въ свою очередь вполнѣ опредѣляется величиною произведеннаго имъ отклоненія подвижной части, т. е. положеніемъ стрѣлки на шкалѣ прибора. Слѣдовательно, каждому дѣленію шкалы ваттметра соотвѣтствуетъ нѣкоторая совершенно опредѣленная мощность. И если цѣна каждаго дѣленія опредѣлена предварительнымъ градуированіемъ, то приборъ можетъ служить для измѣренія мощностей.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

Электрическое сопротивленіе и законы распредѣленія токовъ.

---

58. Законъ Ома въ общемъ случаѣ.—Зависимость между силою тока, э.-д. силой и сопротивленіемъ цѣпи, выражающаяся въ законѣ Ома (см. § 20), имѣетъ мѣсто всегда, какова бы ни была природа э.-д. силъ, возбуждающихъ электрическій токъ, и каковы бы ни были тѣ проводники, изъ которыхъ составлена электрическая цѣпь.

Практически можетъ случиться и часто это бываетъ, что въ данной цѣпи дѣйствуетъ не одна опредѣленная э.-д. сила, но цѣлый рядъ различныхъ э.-д. силъ. Одинъ изъ нихъ являются активными, т. е. онъ именно и возбуждаютъ токъ въ дѣйствительности существующій. Мы будемъ считать эти э.-д. силы положительными. Другія э.-д. силы иногда противодѣйствуютъ первымъ, сопротивляются теченію электричества въ направленіи, опредѣляемомъ первыми, которымъ приходится преодолѣвать эти *обратныя электродвижущія силы*. Ясно конечно, что обратныя э.-д. силы поглощаютъ собою часть активныхъ, положительныхъ э.-д. силъ и, такимъ образомъ, только разность между ними можно разсматривать, какъ причину возбуждающую токъ и преодолѣвающую сопротивленіе цѣпи. Если приписать обратнымъ э.-д. силамъ знакъ минусъ, т. е. считать ихъ отрицательными, то очевидно результирующую э. д. силу, возбуждающую токъ, надо считать равною алгебраической суммѣ всѣхъ э.-д. силъ.

Что касается сопротивленія всей цѣпи, то его должно разсматривать, какъ сумму сопротивленій отдѣльныхъ частей ея, послѣдовательно соединенныхъ, ибо электрическій токъ есть про-

цѣсть, общій и одновременно протекающій для всѣхъ частей цѣпи, и слѣдовательно сила тока должна опредѣляться совокупностью всѣхъ отдѣльныхъ сопротивленій.

Итакъ, основываясь на всемъ вышесказанномъ, мы можемъ написать для самаго общаго случая:

$$i = \frac{\Sigma e}{\Sigma r}.$$

Такъ какъ, вообще говоря, мы можемъ иногда имѣть дѣло лишь съ нѣкоторымъ участкомъ какой либо замкнутой цѣпи, и все же законъ Ома долженъ имѣть мѣсто въ примѣненіи къ нему, если только, конечно, учтены нами всѣ э.-д. силы и всѣ сопротивленія на этомъ участкѣ, то, слѣдовательно, въ выраженіи закона Ома въ числѣ э.-д. силъ можетъ оказаться и внѣшняя э.-д. сила, т. е. разность потенціаловъ между концами участка. Подобный случай представленъ схематически на рисункѣ 84.

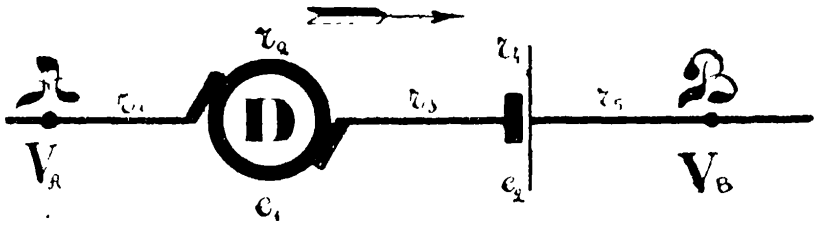


Рис. 84.

Здѣсь взятъ участокъ цѣпи между точками A и B. На этомъ участкѣ дѣйствуютъ слѣдующія э.-д. силы: во-первыхъ, внѣшняя э.-д. сила—разность потенціаловъ $V_A - V_B$ и, во-вторыхъ, внутреннія э.-д. силы e_1 и e_2. При этомъ пусть, напримѣръ, e_1 представляетъ собою э.-д. силу динамомашины D, а e_2 — э.-д. силу гальваническаго элемента, представленнаго въ видѣ двухъ черточекъ, какъ это обычно дѣлаютъ на схемахъ. Затѣмъ r_1, r_2, r_3 и т. д. представляютъ собою сопротивленія отдѣльныхъ частей, послѣдовательно включенныхъ между точками A и B. Прилагая законъ Ома къ настоящему случаю, принято отдѣлять разность потенціаловъ отъ внутреннихъ э.-д. силъ и въ виду этого пишутъ:

$$i = \frac{V_A - V_B + \Sigma e}{\Sigma r},$$

гдѣ

$$\Sigma e = e_1 + e_2$$

и

$$\Sigma r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5$$

Исходя изъ послѣдней формулировки закона Ома, можно легко получить различные частные случаи. Такъ, представимъ себѣ, что точки A и B (рис. 84) приведены въ соприкосновеніе. Тогда очевидно: $V_A - V_B = 0$. Мы получимъ замкнутую цѣпь съ сопротивленіемъ Σr, въ которой дѣйствуютъ двѣ э.-д. силы e_1 и e_2. Въ простѣйшемъ случаѣ, когда имѣется лишь одна э.-д. сила, обозначивъ полное сопротивленіе нашей замкнутой цѣпи черезъ r, имѣемъ:

$$i = \frac{e}{r}.$$

Если же, наоборотъ, на участкѣ AB отсутствуютъ какія либо внутреннія э.-д. силы, т. е. если въ нашемъ случаѣ:

$$e_1 = 0$$
$$e_2 = 0,$$

то получаемъ:

$$i = \frac{V_A - V_B}{\Sigma r}.$$

Обозначая для краткости черезъ r полное сопротивленіе между точками A и B, имѣемъ:

$$i = \frac{V_A - V_B}{r}.$$

Иногда предпочитаютъ писать формулировку закона Ома въ такомъ видѣ:

$$V_A - V_B = ri.$$

Наконецъ, очевидно, можно придать этой формулировкѣ видъ, непосредственно опредѣляющій величину электрическаго сопротивленія:

$$r = \frac{V_A - V_B}{i}.$$

59. Единица электрическаго сопротивленія. —Исходя изъ связи между силой тока, э.-д. силой и сопротивленіемъ, нетрудно установить единицу сопротивленія. Дѣйствительно, если положить:

$$V_A - V_B = 1$$
$$i = 1,$$

то очевидно получаемъ:

$$r = 1$$

Такимъ образомъ, *за единицу сопротивленія мы должны принять сопротивленіе такого проводника, по которому течетъ токъ силою въ единицу подъ вліяніемъ разности потенціаловъ между концами проводника, равной единицѣ.*

Въ системѣ практическихъ электромагнитныхъ единицъ единица сопротивленія называется *омомъ*. Слѣдовательно:

$$1 \text{ омъ} = \frac{1 \text{ вольтъ}}{1 \text{ амперъ}},$$

т. е. *омъ есть сопротивленіе такого проводника, по которому течетъ токъ въ одинъ амперъ при разности потенціаловъ въ одинъ вольтъ.*

Тщательными изслѣдованіями установлено, что сопротивленіе ртутнаго столба сѣченіемъ въ 1 кв. мм. и длиною въ 106,3 см. при температурѣ таянія льда весьма близко къ ому.

60. Удѣльное сопротивленіе.—Непосредственный опытъ показываетъ, что сопротивленіе всякаго проводника зависитъ отъ его геометрическихъ размѣровъ, т. е. отъ длины и поперечнаго сѣченія, отъ природы того вещества, изъ котораго онъ сдѣланъ, и отъ температуры.

Что касается геометрическихъ размѣровъ проводника, то тотъ же опытъ даетъ намъ слѣдующія указанія. Если мы будемъ примѣнять въ качествѣ проводника проволоку изъ нѣкотораго опредѣленнаго матеріала и при томъ строго опредѣленнаго діаметра и если затѣмъ, поддерживая неизмѣнную разность потенціаловъ между концами проводника, будемъ длину его дѣлать послѣдовательно равною l, $2l$, $3l$ и т. д., то замѣтимъ, что сила тока принимаетъ послѣдовательно значенія i, $\frac{1}{2}i$, $\frac{1}{3}i$ и т. д., т. е. при прочихъ равныхъ условіяхъ *электрическое сопротивленіе проводника прямо-пропорціонально его длинѣ.* Далѣе, поддерживая снова неизмѣнную разность потенціаловъ между концами проводника и сохраняя его длину и матеріалъ, изъ котораго онъ сдѣланъ, будемъ послѣдовательно примѣнять діаметры d, $2d$, $3d$ и т. д. Измѣреніе силы тока въ этомъ случаѣ показываетъ, что она послѣдовательно принимаетъ значенія i, $4i$, $9i$ и т. д. Слѣдовательно, *электрическое сопротивленіе проводника обратно-пропорціонально его поперечному сѣченію.* Такимъ образомъ можемъ написать:

$$r = \rho \frac{l}{s},$$

гдѣ ρ есть коэффиціентъ пропорціональности, зависящій отъ природы вещества проводника и отъ его температуры. Его называютъ *удѣльнымъ сопротивленіемъ*. Мотивы принятія этого термина состоятъ въ томъ, что если мы положимъ:

$$l = 1,$$
$$s = 1,$$

то получаемъ:

$$r = \rho,$$

т. е. *удѣльнымъ сопротивленіемъ называется сопротивленіе такого проводника, длина котораго равна единицѣ и поперечное сѣченіе котораго также равно единицѣ.*

Практически при измѣреніи электрическихъ проводниковъ за единицу длины обыкновенно принимаютъ метръ, а за единицу площади—квадратный миллиметръ.

Удѣльное сопротивленіе, какъ это ясно изъ предыдущаго, для каждаго вещества имѣетъ опредѣленное значеніе только при опредѣленной температурѣ. Вообще говоря, для всѣхъ металловъ оно увеличивается съ возрастаніемъ температуры, а для угля и для растворовъ солей и кислотъ наблюдается обратное, при чемъ это увеличеніе или уменьшеніе почти пропорціонально повышенію температуры. Такимъ образомъ, практически можно положить:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

гдѣ ρ_0 есть удѣльное сопротивленіе при температурѣ таянія льда, t есть температура и α—*температурный коэффиціентъ сопротивленія.*

Ясно, конечно, что имѣетъ мѣсто и такое соотношеніе:

$$r = r_0(1 + \alpha t),$$

гдѣ r_0 представляетъ собою сопротивленіе проводника при температурѣ таянія льда.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ приведены величины удѣльнаго сопротивленія при 0° и температурнаго коэффиціента для различныхъ матеріаловъ. При этомъ подъ удѣльнымъ сопротивленіемъ подразумѣвается сопротивленіе 1 метра проводника сѣченіемъ въ 1 кв. мм.

МАТЕРІАЛЪ.	ρ_0	α (Отъ 0 до 100°)
Серебро отожженое	0,01492	0,004
» твердотянутое	0,01620	
Мѣдь отожженая	0,01584	0,00388
» твердотянутая	0,01620	
Золото отожженое.	0,02041	0,00365
» твердотянутое	0,02077	
Алюминій	0,02889	0,00390
Платина.	0,08982	0,00347
Желѣзо	0,09698	0,00463
Ртуть	0,9434	0,00887
Манганинъ (84 *Cu*, 4 *Ni*, 12 *Mn*) .	0,42	— 0,000008
Константанъ (60 *Cu*, 40 *Ni*) . . .	0,49	— 0,000005
Ретортный уголь	50	— 0,0004

61. Электрическая проводимость.—Величина, обратная сопротивленію проводника, называется *электрическою проводимостью* его. Ее обозначаютъ буквой g. Такимъ образомъ:

$$g = \frac{1}{r}.$$

Произведя соотвѣтствующую замѣну въ формулировкѣ закона Ома, получаемъ:

$$i = (V_A - V_B) \cdot g,$$

т. е. *сила тока при данной разности потенціаловъ тѣмъ больше, чѣмъ больше проводимость.*

Единицею проводимости будетъ очевидно проводимость такого проводника, сопротивленіе котораго равно единицѣ. Въ практической электромагнитной системѣ единица проводимости называется *мо*. Слѣдовательно, *мо есть проводимость такого проводника, сопротивленіе котораго равно одному ому.*

Ясно, что при изслѣдованіи явленій, происходящихъ въ электрическихъ цѣпяхъ, мы по желанію могли бы пользоваться либо

понятіемъ о сопротивленіи цѣпи, либо понятіемъ о проводимости ея. Чисто исторически объясняется то обстоятельство, что нормально оперируютъ только съ сопротивленіемъ цѣпи. Понятіе же о проводимости нашло себѣ болѣе или менѣе широкое примѣненіе пока лишь въ нѣкоторыхъ отдѣлахъ теоріи перемѣннаго тока, гдѣ введеніе его позволило значительно упростить описаніе и изслѣдованіе подчасъ довольно сложныхъ явленій.

62. Законы Кирхгофа.—До сихъ поръ мы предполагали, что контуръ нашей цѣпи простой. Въ этомъ случаѣ при установившемся состояніи системы зависимость между величинами, характеризующими ее, въ достаточной мѣрѣ дается закономъ Ома. Но когда наша цѣпь развѣтвлена и имѣетъ видъ болѣе или менѣе сложной сѣти, вопросы, касающіеся распредѣленія тока, проще всего рѣшаются на основаніи двухъ теоремъ, извѣстныхъ подъ названіемъ *законовъ Кирхгофа.*

Первый законъ Кирхгофа гласитъ слѣдующее:

Если нѣсколько проводниковъ сходятся въ одной точкѣ, то алгебраическая сумма силъ токовъ, идущихъ въ каждомъ изъ нихъ, равна нулю:

$$\Sigma i = 0.$$

При этомъ алгебраическомъ суммированіи мы приписываемъ току тотъ или иной знакъ въ зависимости отъ того, направленъ ли онъ къ узлу (общей точкѣ) или—отъ узла.

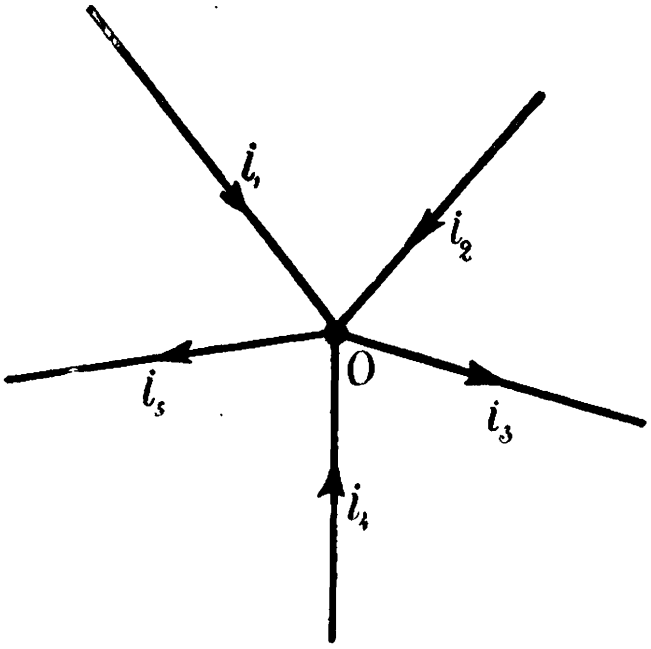


Рис. 85.

Содержаніе перваго закона Кирхгофа состоитъ въ констатированіи факта, что количество электричества, притекающаго въ каждый элементъ времени къ узлу, въ точности равно количеству электричества, уходящаго отъ узла за это время. Дѣйствительно, пусть точка O (рис. 85) представляетъ собою узелъ, въ которомъ сходятся токи i_1, i_2 и т. д. При этомъ къ узлу направлены токи i_1, i_2 и i_4, а отъ узла — i_3 и i_5. Обозначивъ черезъ Δt элементъ времени и черезъ Δq и $\Delta q'$ количества при-

текающаго и утекающаго за это время электричества, можемъ написать:

$$\Delta q = i_1 \cdot \Delta t + i_2 \cdot \Delta t + i_4 \cdot \Delta t = \\ = (i_1 + i_2 + i_4) \cdot \Delta t$$

и

$$\Delta q' = i_3 \cdot \Delta t + i_5 \cdot \Delta t = \\ = (i_3 + i_5) \Delta t.$$

Но, какъ было указано выше (см. § 38), электричество ведетъ себя подобно несжимаемой жидкости, а потому должно быть:

$$\Delta q = \Delta q',$$

т. е.

$$(i_1 + i_2 + i_4) \cdot \Delta t = (i_3 + i_5) \cdot \Delta t.$$

Слѣдовательно:

$$i_1 + i_2 + i_4 - i_3 - i_5 = 0$$

или

$$\Sigma i = 0.$$

Второй законъ Кирхгофа гласитъ слѣдующеее:

Во всякомъ замкнутомъ контурѣ, входящемъ въ составъ любой сѣти, сумма произведеній силъ токовъ на сопротивленія отдѣльныхъ частей его, распространенная на весь контуръ, равна суммѣ всѣхъ электродвижущихъ силъ, дѣйствующихъ въ этомъ контурѣ:

$$\Sigma ri = \Sigma e.$$

Въ справедливости этого положенія, представляющаго собою по существу не что иное, какъ нѣкоторое развитіе закона Ома, нетрудно убѣдиться. Представимъ себѣ контуръ *ABCDE*, входящій въ составъ нѣкоторой сложной системы проводовъ (рис. 86). Пусть i_1, i_2, i_3 и т. д.

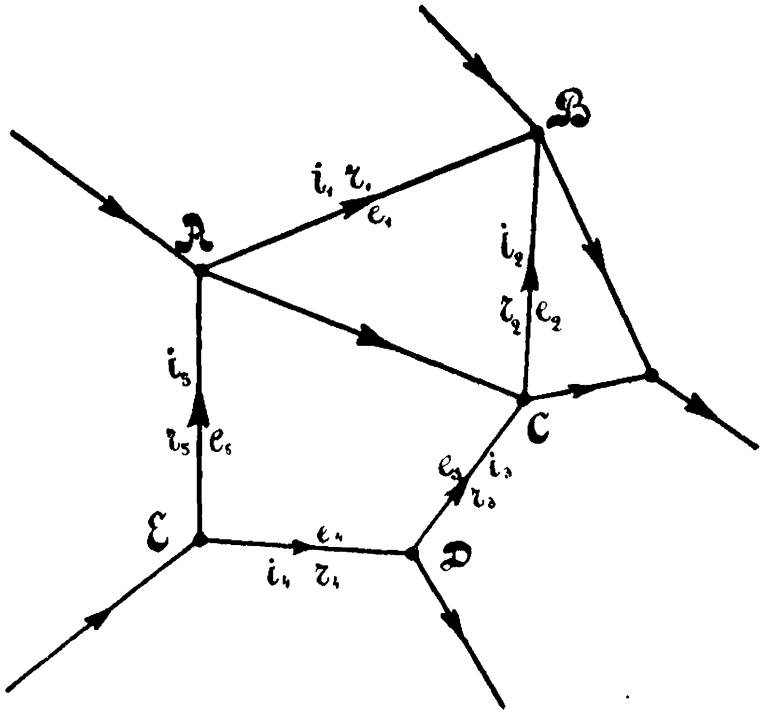


Рис. 86.

и r_1, r_2, r_3 и т. д. представляютъ собою силы токовъ и сопротивленія въ отдѣльныхъ частяхъ этого контура, а e_1, e_2, e_3 и т. д.— алгебраическія суммы внутреннихъ э.-д. силъ, соотвѣтствующія тѣмъ же частямъ контура. Мы можемъ себѣ представить, что эти э.-д. силы генерируются, напримѣръ динамомашинами, гальваническими элементами и т. п., введенными въ отдѣльныхъ частяхъ нашего контура, но не показанными на рисункѣ.

Пользуясь теперь общей формулировкой закона Ома, можемъ для каждаго изъ участковъ написать:

$$i_1 = \frac{A_A - V_B + e_1}{r_1}$$
$$i_2 = \frac{V_B - V_C + e_2}{r_2}$$
$$\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$
$$\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$
$$i_5 = \frac{V_E - V_A + e_5}{r_5}.$$

При составленіи этихъ соотношеній необходимо условиться относительно того, какое направленіе въ нашемъ контурѣ мы принимаемъ за положительное: направленіе ли по часовой стрѣлкѣ—*ABCDE*, или обратное—*EDCBA*. Разъ только выборъ сдѣланъ, то токи и э.-д. силы, текущіе и дѣйствующія въ этомъ направленіи, мы должны считать за положительные, въ обратномъ же случаѣ—за отрицательные.

Переписываемъ теперь вышеприведенныя соотношенія слѣдующимъ образомъ:

$$r_1 i_1 = V_A - V_B + e_1$$
$$r_2 i_2 = V_B - V_C + e_2$$
$$\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$
$$\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$
$$r_5 i_5 = V_E - V_A + e_5.$$

Просуммировавъ правыя и лѣвыя части, получаемъ:

$$\Sigma ri = \Sigma e.$$

Въ частномъ случаѣ, когда въ контурѣ нѣтъ э.-д. силъ или сумма ихъ приводится къ нулю, имѣемъ:

$$\Sigma ri = 0.$$

Такъ всегда бываетъ для контура, составленнаго изъ однихъ металловъ при условіи постоянства магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ, и равенства температуръ всѣхъ спаевъ.

63. Измѣреніе электрическихъ сопротивленій.— Познакомимся теперь съ основными методами измѣренія сопротивленія проводниковъ. Тѣ сопротивленія, съ которыми обычно приходится встрѣчаться на практикѣ, можно подраздѣлить на два класса. Одни представляютъ собою сопротивленія различныхъ механизмовъ, аппаратовъ и вообще тѣхъ частей электрической цѣпи, прямое назначеніе которыхъ не состоитъ въ томъ, чтобы вносить въ цѣпь нѣкоторое сопротивленіе. Къ этому классу относятся, напримѣръ, сопротивленія обмотокъ динамомашинъ и двигателей, сопротивленія гальванометра, амперметра и т. п., сопротивленіе проводовъ, передающихъ электрическую энергію, и т. д. Ко второму классу мы отнесемъ сопротивленія, которыми обладаютъ спеціальныя устройства, предназначенныя либо для регулированія силы тока въ цѣпи, либо для сравненія съ ними, какъ съ эталонами, различныхъ измѣряемыхъ сопротивленій. Эти спеціальныя устройства въ зависимости отъ цѣли ихъ, а иногда и отъ конструкціи, носятъ названія *реостатовъ*, *магазиновъ сопротивленій*, *эталоновъ сопротивленій*. Такъ какъ всѣ они въ той или иной формѣ встрѣчаются при всѣхъ электрическихъ измѣреніяхъ и изслѣдованіяхъ вообще и при измѣреніяхъ сопротивленій въ частности, то мы предварительно вкратцѣ на нихъ остановимся.

Реостатами обычно называются балластныя сопротивленія, которыя вводятся въ цѣпь съ исключительною цѣлью ослабленія тока до желаемыхъ предѣловъ. Въ виду этого полное сопротивленіе реостата подраздѣляется на отдѣльныя части путемъ дѣленія тѣхъ проволокъ, изъ которыхъ состоитъ реостатъ. Кромѣ того дѣлаютъ особыя приспособленія для того, чтобы можно было по желанію измѣнять величину сопротивленія части реостата, введенной въ цѣпь. На рисункѣ 87

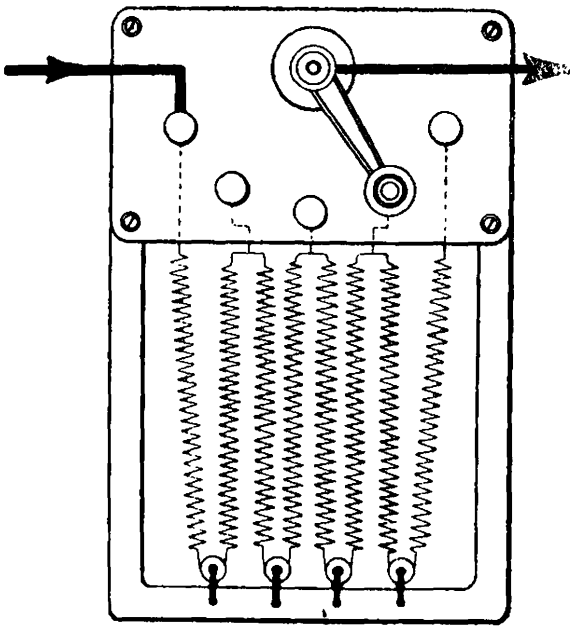


Рис. 87.

показано наиболѣе часто встрѣчающееся устройство реостатовъ. Проволока, входящая въ составъ его, обыкновенно съ цѣлью съэкономить мѣсто свивается въ видѣ спиралей, которыя затѣмъ прикрѣпляются къ рамѣ при помощи изолирующихъ—фарфоровыхъ напримѣръ—частей. Отдѣльныя проволочныя спирали соединяются одна съ другой послѣдовательно. Кромѣ того нѣкоторыя изъ мѣстъ соединенія отдѣльныхъ спиралей приключаются къ такъ называемымъ контактамъ, т. е. металлическимъ, расположеннымъ по дугѣ круга, пластинкамъ, по которымъ можетъ скользить металлическій же рычагъ. Реостатъ вводятъ въ цѣпь, присоединяя къ ней начало проволочныхъ спиралей и ось рычага. Ясно, что при такихъ условіяхъ, мѣняя положеніе рычага на контактныхъ пластинкахъ, мы будемъ вводить въ цѣпь большую или меньшую часть реостата.

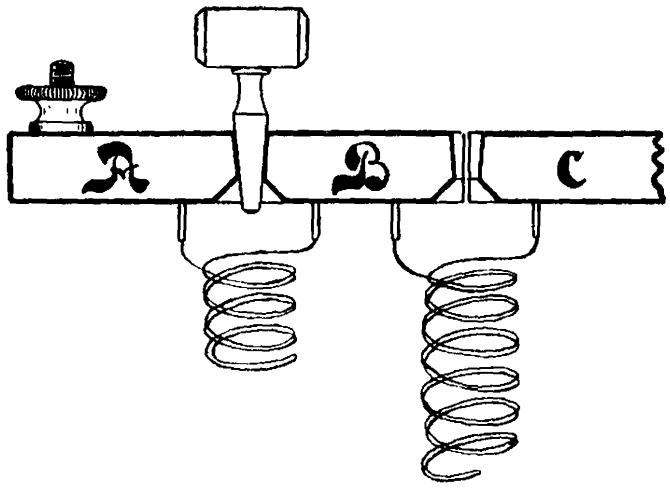


Рис. 88.

Магазинами сопротивленій называютъ комбинацію собранныхъ въ томъ или иномъ видѣ сопротивленій, величина которыхъ по возможности точно извѣстна. На рисункѣ 88 показаны устройство и способъ соединенія отдѣльныхъ проволочныхъ катушекъ, входящихъ въ составъ магазина сопротивленій. Катушки состоятъ изъ хорошо изолированной проволоки, которую передъ навиваніемъ складываютъ пополамъ. Получается такъ называемая бифилярная обмотка, коэффиціентъ самоиндукціи которой весьма малъ, потому что магнитныя поля, создаваемыя каждой изъ половинъ въ отдѣльности при прохожденіи тока, направлены въ противоположныя стороны и вслѣдствіе этого взаимно уничтожаются. Такимъ образомъ, магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ бифилярной обмоткой катушки, ничтожно малъ. Оба конца каждой катушки припаиваютъ къ двумъ мѣднымъ массивнымъ пластинамъ *A* и *B*, *B* и *C* и т. д., которыя обыкновенно укрѣпляются на эбонитовой доскѣ, такъ что онѣ одна отъ другой хорошо изолированы. Двѣ сосѣднихъ пластинки можно коротко соединять между собою, втыкая между ними хорошо пригнанный толстый латунный штепсель. Когда штеп-

сель вынуть, то сопротивленіе между B и C равно сопротивленію проволоки; когда же штепсель воткнутъ, то сопротивленіе практически можно считать равнымъ нулю. Обыкновенно цѣлый рядъ такихъ отдѣльныхъ сопротивленій собирается въ одномъ и томъ же ящикѣ, на эбонитовой крышкѣ котораго располагаются пластины и штепселя. Общій видъ подобнаго магазина сопротивленій представленъ на рисункѣ 89. Что касается величины отдѣльныхъ сопротивленій, входящихъ въ составъ магазина, то нормально она выражается цѣлымъ числомъ омовъ, или цѣлымъ числомъ десятыхъ, сотыхъ и т. д. ома. Сопротивленія комбинируютъ такъ, чтобы въ извѣстныхъ предѣлахъ можно было составить любое сопротивленіе съ точностью, опредѣляемою наименьшимъ сопротивленіемъ. Часто, напримѣръ, примѣняется такой рядъ сопротивленій:

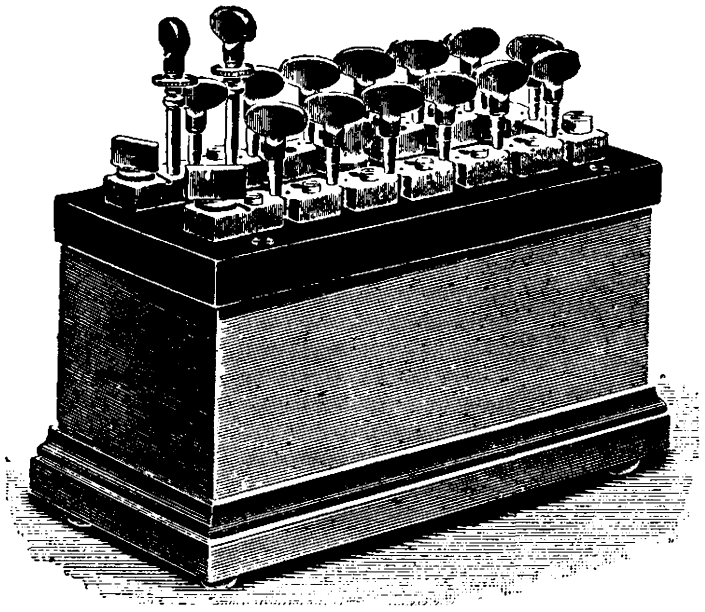


Рис. 89.

0,1; 0,2; 0,2; 0,5; 1; 2; 2; 5; 10; 20; 20; 50; 100; 200; 200; 500 и т. д. омовъ.

Примѣняются иногда и такъ называемые декадные ряды сопротивленій, въ составъ которыхъ входитъ по десяти одинаковыхъ сопротивленій послѣдовательно восходящихъ порядковъ, напримѣръ:

0,1; 1; 10; 100 и т. д. омовъ.

При устройствѣ магазиновъ сопротивленій, въ особенности, когда приходится имѣть въ виду точныя измѣренія, необходимо считаться съ температурнымъ коэффиціентомъ сопротивленія. Величина этого коэффиціента можетъ служить мѣриломъ степени непригодности даннаго матеріала для устройства магазиновъ сопротивленій. Очевидно наиболѣе подходящимъ будетъ такой матеріалъ, сопротивленіе котораго обладаетъ наименьшимъ температурнымъ коэффиціентомъ. Въ то время, какъ чистые металлы обладаютъ сравнительно большимъ температурнымъ коэффиціентомъ (см. таблицу въ § 60), у нѣкоторыхъ

сплавовъ этотъ коэффиціентъ настолько незначителенъ, что практически его иногда совсѣмъ не принимаютъ во вниманіе. Были произведены спеціальныя изысканія, и въ этомъ отношеніи удалось достигнуть замѣчательныхъ результатовъ. Такъ у манганина и константана температурный коэффиціентъ меньше 0,00001. Во всякомъ случаѣ всѣ болѣе или менѣе точные магазины сопротивленій снабжаются указаніемъ той температуры (обыкновенно 20°), при которой вполнѣ справедливы надписи, указывающія величины отдѣльныхъ сопротивленій.

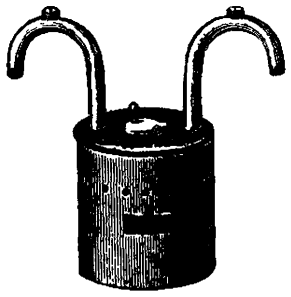


Рис. 90.

Ясно, что выполненные съ достаточною тщательностью магазины сопротивленій могутъ служить эталонами, т. е. тѣми основными мѣрами, съ которыми мы сравниваемъ другія сопротивленія при ихъ измѣреніяхъ. Часто однако эталонныя сопротивленія не собираются въ магазины, а каждое помѣщается въ особую камеру (рис. 90), снабженную термометромъ или гнѣздомъ для него, и заканчивается толстыми мѣдными стержнями, служащими для введенія эталона въ цѣпь. Съ цѣлью поддержанія постоянной температуры эталонное сопротивленіе помѣщаютъ иногда въ ванну изъ хорошо изолирующаго жидкаго масла, которое при этомъ перемѣшиваютъ. Вообще надо сказать, что техническая сторона вопроса объ эталонахъ электрическихъ сопротивленій разработана весьма совершенно.

Обратимся теперь къ разсмотрѣнію нѣкоторыхъ методовъ измѣренія сопротивленій.

Способъ подстановки, одинъ изъ простѣйшихъ, заключается въ слѣдующемъ. Въ цѣпь, состоящую изъ генератора B — напримѣръ гальваническаго элемента,—гальванометра или амперметра G и регулировочнаго реостата R, вводятъ сначала испытуемое сопротивленіе x (рис. 91). Замѣтивъ получающееся при этомъ отклоненіе гальванометра или амперметра G, выключаемъ x и вводимъ вмѣсто него магазинъ сопротивленій M. При этомъ подбираемъ въ немъ такое сопротивленіе r, чтобы отклоненіе было то же самое и, слѣдовательно, токъ имѣлъ ту же силу, что и раньше. Если при этомъ э.-д. сила генератора B остается все время неизмѣнною, то очевидно:

$$x = r.$$

Способъ мостика Витстона представляетъ собою наиболѣе распространенный и одинъ изъ точнѣйшихъ методовъ измѣренія сопротивленій. Идея этого способа заключается въ слѣдующемъ:

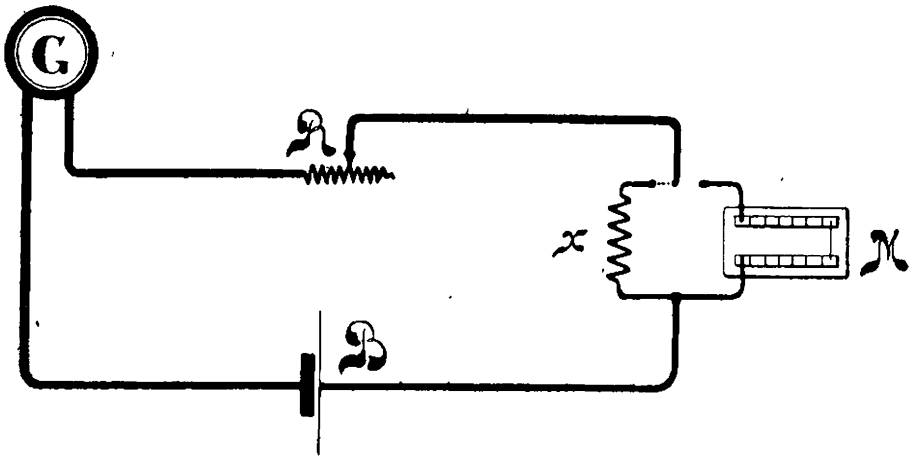


Рис. 91.

Представимъ себѣ четыре вѣтви AC, CB, AD и DB, соединенныя такъ, какъ это показано на рисункѣ 92. Сопротивленія этихъ вѣтвей обозначимъ черезъ r_1, r_2, r_3 и r_4. Между точками A и B помѣщается гальваническій элементъ E, а въ «мостикѣ» CD находится гальванометръ G. Обозначимъ сопротивленіе мостика CD черезъ r_0 и допустимъ, что по нашей системѣ проводниковъ текутъ токи, какъ это показано на рисункѣ стрѣлками. Пусть силы токовъ въ четырехъ вѣтвяхъ будутъ i_1, i_2,

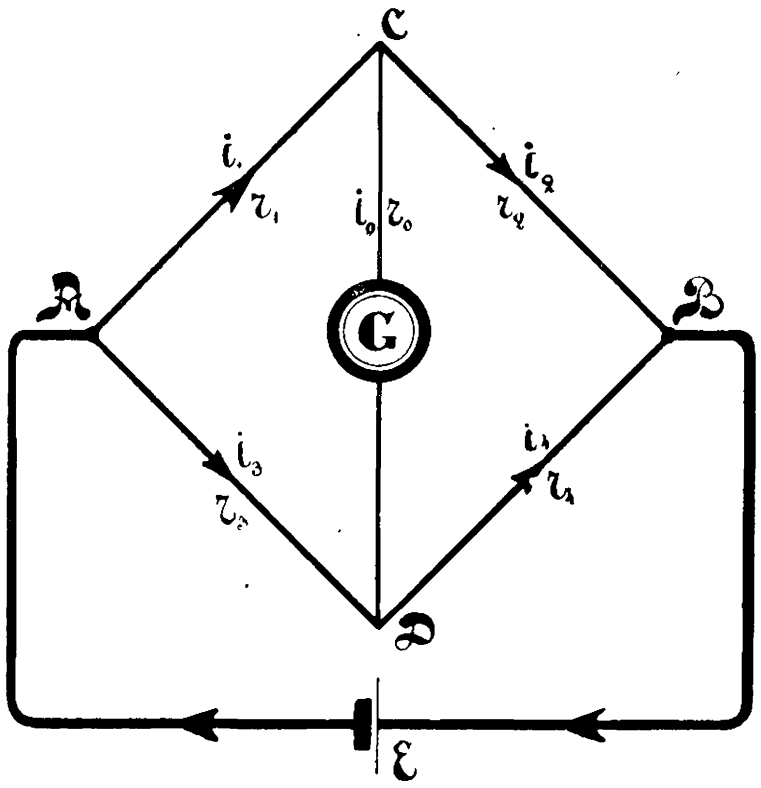


Рис. 92.

i_3 и i_4 и въ мостикѣ—i_0. Въ то время, какъ направленія токовъ въ вѣтвяхъ вполнѣ опредѣляются направленіемъ э.-д. силы элемента E, направленіе тока i_0 въ мостикѣ CD зависитъ еще и отъ соотношенія между сопротивленіями четырехъ вѣтвей. Ихъ всегда можно подобрать такимъ образомъ, чтобы разность потенціаловъ между точками C и D сдѣлалась равной нулю. Въ такомъ случаѣ, очевидно, имѣемъ:

$$i_0 = \frac{V_C - V_D}{r_0} = 0.$$

Выполненіе этого условія существенно въ методѣ мостика Витстона. Допустимъ, что оно удовлетворено.

Примѣняя теперь первый законъ Кирхгофа къ узламъ C и D, получаемъ:

$$i_1 = i_2$$
$$i_3 = i_4.$$

Далѣе, на основаніи второго закона Кирхгофа можемъ написать для контура ACD:

$$r_1 i_1 - r_3 i_3 = 0$$

и для контура CBD:

$$r_2 i_2 - r_4 i_4 = 0.$$

Изъ этихъ выраженій находимъ:

$$r_1 i_1 = r_3 i_3$$
$$r_2 i_2 = r_4 i_4.$$

Раздѣлимъ теперь эти равенства одно на другое:

$$\frac{r_1 i_1}{r_2 i_2} = \frac{r_3 i_3}{r_4 i_4}.$$

Примѣняя теперь результатъ, полученный на основаніи перваго закона Кирхгофа, получаемъ наконецъ:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Таково должно быть соотношеніе между сопротивленіями вѣтвей для того, чтобы черезъ гальванометръ G, помѣщенный въ мостикѣ, токъ совсѣмъ не проходилъ.

Практически, отсутствіемъ въ гальванометрѣ отклоненія пользуются, какъ указаніемъ того, что это соотношеніе достигнуто.

Если при этомъ три изъ четырехъ сопротивленій намъ извѣстны, то очевидно нетрудно опредѣлить простымъ разсчетомъ неизвѣстное четвертое. Если, напримѣръ, неизвѣстно сопротивленіе r_1 вѣтви AC, то имѣемъ:

$$r_1 = r_2 \frac{r_3}{r_4}.$$

Изъ послѣдняго соотношенія мы видимъ, что, собственно говоря, необходимо знать лишь одно сопротивленіе r_2. Что же касается двухъ другихъ, то достаточно знать только ихъ отношеніе. Этимъ обстоятельствомъ пользуются для упрощенія устройства схемы мостика Витстона. Между прочимъ въ практикѣ распространенъ такъ называемый *линейный мостикъ Витстона.* При помощи его мы можемъ весьма просто опредѣлить какъ разъ отношеніе двухъ сопротивленій. На рисункѣ 93 подобный

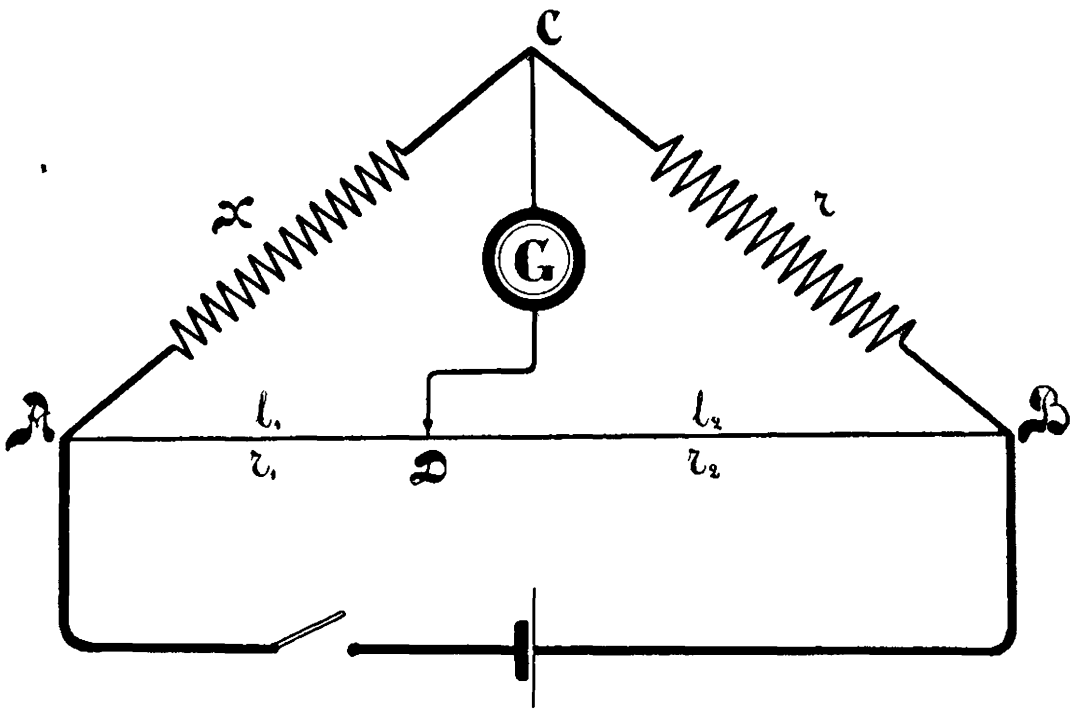


Рис. 93.

линейный мостикъ показанъ схематически. Въ вѣтви AC находится неизвѣстное сопротивленіе x, въ вѣтви CB — эталонное сопротивленіе r. Двѣ остальныя вѣтви AD и DB представляютъ собою части одной и той же проволоки AB, натянутой на шкалѣ съ дѣленіями, которая позволяетъ опредѣлять длины l_1 и l_2 этихъ вѣтвей. Точка D осуществляется при посредствѣ особаго контактнаго приспособленія, скользящаго вмѣстѣ съ поддерживающею его телѣжкою вдоль шкалы. Обозначая че-

резъ r_1 и r_2 сопротивленія вѣтвей AD и DB, на основаніи предыдущаго можемъ написать:

$$x = r\frac{r_1}{r_2}.$$

Но на основаніи § 60 имѣемъ:

$$r_1 = \rho\frac{l_1}{s}$$

$$r_2 = \rho\frac{l_2}{s},$$

Въ обоихъ случаяхъ ρ и s одно и то же, ибо мы имѣемъ дѣло съ частями одной и той же проволоки. Слѣдовательно:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

и окончательно:

$$x = r\frac{l_1}{l_2}.$$

Такимъ образомъ, вмѣсто отношенія двухъ сопротивленій мы можемъ брать отношеніе двухъ длинъ. Это значительно упрощаетъ измѣреніе. На практикѣ встрѣчаются иногда линейные мостики, въ которыхъ ради ускоренія вычисленій на шкалѣ нанесены непосредственно отношенія:

$$\frac{l_1}{l_2}.$$

Способъ амперметра и вольтметра весьма часто примѣняется въ электротехнической практикѣ благодаря тому, что этотъ способъ позволяетъ совсѣмъ обойтись безъ какихъ бы то ни было эталоновъ сопротивленія и въ то же время амперметръ и вольтметръ—это такіе приборы, которые наиболѣе часто встрѣчаются въ установкахъ. Расположеніе, которымъ пользуются въ этомъ способѣ, представлено на рисункѣ 94. Здѣсь D есть генераторъ электрическаго тока, R — регулировочный реостатъ, A — ампер-

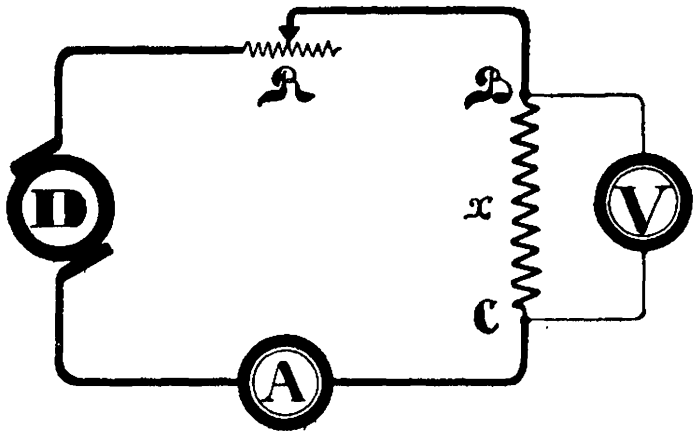


Рис. 94.

метръ и x—неизвѣстное сопротивленіе. Къ зажимамъ его B и C присоединяется вольтметръ V. Затѣмъ одновременно производится наблюденіе силы тока i и разности потенціаловъ $V_B - V_C$. Тогда очевидно имѣемъ на основаніи закона Ома:

$$x = \frac{V_A - V_B}{i}.$$

При этомъ, если разность потенціаловъ выражена въ вольтахъ, а сила тока въ амперахъ, то отношеніе ихъ даетъ величину x непосредственно въ омахъ.

64. Группировка генераторовъ и пріемниковъ. — Остановимся сначала на группировкѣ генераторовъ. Въ практикѣ нерѣдко случается, что одного генератора оказывается недостаточно для полученія тока требуемой силы. При такихъ обстоятельствахъ приходится примѣнять два, три и болѣе генераторовъ, надлежащимъ образомъ соединенныхъ другъ съ другомъ.

Если э.-д. сила генератора ограничена, а условія требуютъ сравнительно большой э.-д. силы, то соединяютъ генераторы въ рядъ *послѣдовательно*, такъ чтобы всѣ отдѣльныя э.-д. силы дѣйствовали въ одномъ и томъ же направленіи. Обыкновенно принято у всѣхъ генераторовъ называть *положительнымъ полюсомъ* тотъ зажимъ, отъ котораго токъ нормально идетъ во внѣшнюю цѣпь, и *отрицательнымъ полюсомъ* — зажимъ, въ который токъ поступаетъ извнѣ (см. § 46).

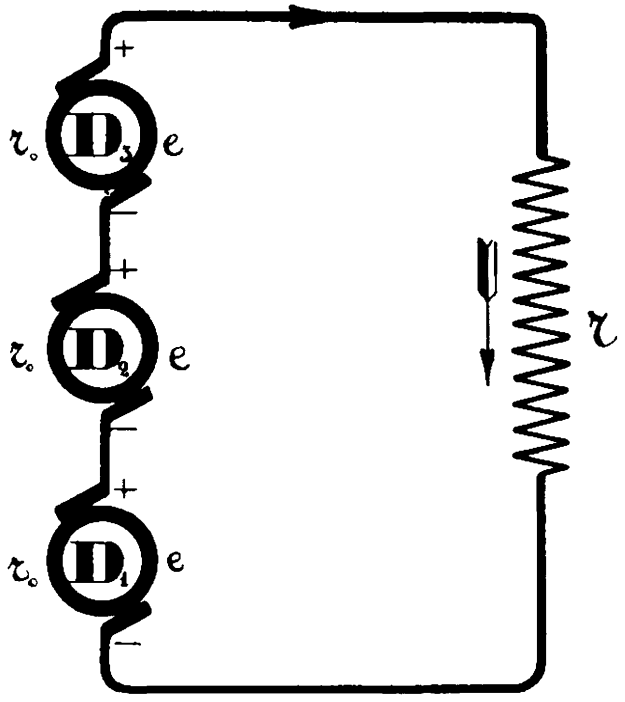


Рис. 95.

Въ такомъ случаѣ мы можемъ сказать, что при послѣдовательномъ соединеніи генераторовъ D_1, D_2, D_3 (рис. 95) положительный полюсъ перваго соединяется съ отрицательнымъ полюсомъ второго и т. д. Если э.-д. сила каждаго генератора есть e, его *внутреннее сопротивленіе* — r_0, число генераторовъ — n и сопротивленіе пріемника вмѣстѣ со всѣми соединительными проводами,

т. е. *внѣшнее сопротивленіе*, равно r, то очевидно полная э.-д. сила, дѣйствующая въ цѣпи, будетъ:

$$ne,$$

полное сопротивленіе будетъ равно:

$$nr_0 + r,$$

и сила тока при послѣдовательномъ соединеніи выразится слѣдующимъ образомъ:

$$i = \frac{ne}{nr_0 + r}.$$

Послѣднее соотношеніе можемъ переписать такъ:

$$i = \frac{e}{r_0 + \frac{r}{n}}.$$

Отсюда видно, что послѣдовательное соединеніе генераторовъ можетъ быть полезнымъ въ тѣхъ случаяхъ, когда внѣшнее сопротивленіе велико по сравненію съ внутреннимъ. Въ противномъ случаѣ послѣдовательное соединеніе само по себѣ очень слабо повліяетъ на усиленіе тока.

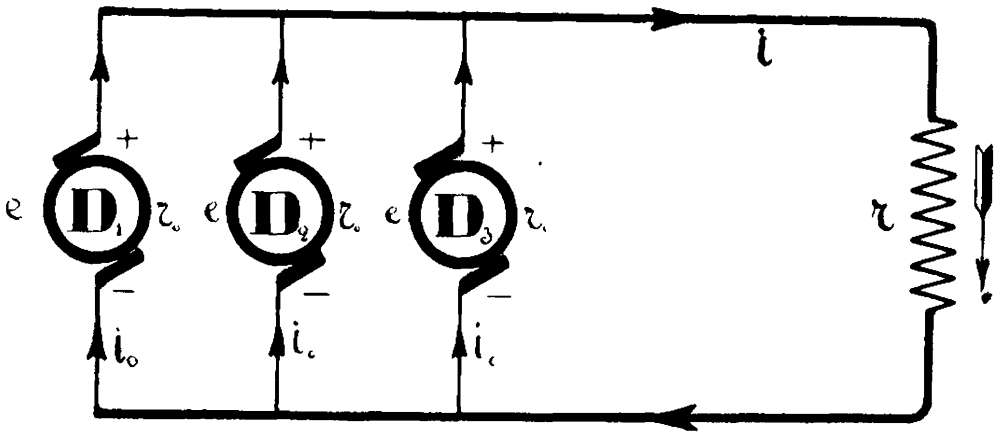


Рис. 96.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда препятствіемъ къ полученію въ пріемникахъ тока достаточной силы является внутреннее сопротивленіе генератора, прибѣгаютъ обыкновенно къ *параллельному соединенію* нѣсколькихъ генераторовъ. При этомъ соединяются вмѣстѣ всѣ положительные полюсы генераторовъ (рис. 96) и соотвѣтственнымъ образомъ всѣ отрицательные. Въ данномъ случаѣ всѣ отдѣльныя э.-д. силы работаютъ параллельно на одно и то же внѣшнее сопротивленіе. Если всѣ генераторы

тождественны, т. е. у всѣхъ ихъ одна и та же э.-д. сила e и одно и то же внутреннее сопротивленіе r_0, то очевидно всѣ они находятся въ одинаковыхъ условіяхъ и, слѣдовательно, сила тока, протекающаго черезъ каждый генераторъ, должна быть одна и та же, скажемъ i_0. Обозначивъ силу тока въ пріемникѣ черезъ i и черезъ n число генераторовъ, соединенныхъ параллельно, можемъ такимъ образомъ написать, основываясь на первомъ законѣ Кирхгофа:

$$i = ni_0.$$

Приложимъ теперь второй законъ Кирхгофа къ любому замкнутому контуру (рис. 96), въ составъ котораго входитъ пріемникъ съ сопротивленіе r:

$$r_0 i_0 + r\, i = e.$$

Выражая i_0 черезъ i, получаемъ:

$$\left(\frac{r_0}{n} + r\right) i = e$$

и окончательно:

$$i = \frac{e}{\frac{r_0}{n} + r}.$$

Такимъ образомъ, при параллельномъ соединеніи n тождественныхъ генераторовъ во внѣшней цѣпи токъ получается такой силы, какъ если бы мы имѣли только одинъ генераторъ съ тою же э.-д. силой, но съ внутреннимъ сопротивленіемъ въ n разъ меньшимъ.

Кромѣ указанныхъ выше комбинацій употребляютъ еще *смѣшанное соединеніе*, при которомъ нѣсколько генераторовъ соединяютъ послѣдовательно, а составленныя такимъ образомъ группы соединяютъ параллельно. Смѣшанное соединеніе особенно часто примѣняется въ случаѣ гальваническихъ элементовъ вообще и аккумуляторовъ въ частности. На рисункѣ 97 представлена схема подобнаго соединенія 15 гальваническихъ элементовъ. Здѣсь мы имѣемъ три параллельныхъ группы, каждая изъ которыхъ состоитъ изъ пяти послѣдовательно соединенныхъ элементовъ. Все происходитъ въ данномъ случаѣ такъ, какъ будто бы параллельно соединены три генератора, э.-д. силу и внутреннее сопротивленіе каждаго изъ которыхъ можно пред-

ставить соотвѣтственно черезъ $5e$ и $5r_0$, сохраняя прежнія обозначенія. Вообще, если число послѣдовательно соединенныхъ

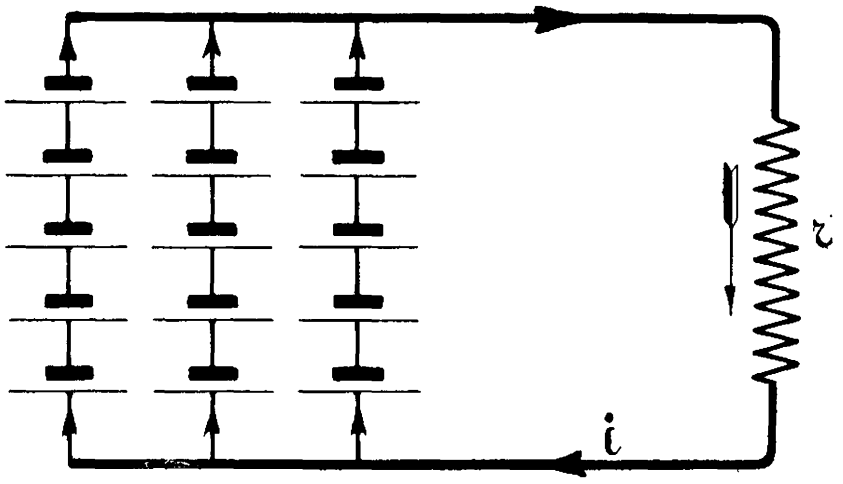


Рис. 97.

генераторовъ равно m, а число параллельныхъ группъ—n, то э.-д. сила и внутреннее сопротивленіе каждой группы выразится черезъ:

$$me,$$
$$mr_0,$$

а сила тока во внѣшней цѣпи выразится такъ (см. параллельное соединеніе):

$$i = \frac{me}{\frac{mr_0}{n} + r}.$$

Замѣтимъ, что всякую комбинацію гальваническихъ или термоэлектрическихъ элементовъ, будутъ ли они соединены послѣдовательно, параллельно или послѣдовательно-параллельно, принято называть *батареей элементовъ*.

Обратимся теперь къ способамъ группировокъ пріемниковъ, т. е. тѣхъ частей цѣпи, въ которыхъ такъ или иначе поглощается энергія электрическаго тока. Иногда впрочемъ подъ именемъ пріемниковъ разумѣютъ только тѣ приборы и аппараты, которые полезно расходуютъ электрическую энергію, всякаго же рода вспомогательныя части цѣпи, какъ-то соединительные провода, измѣрительныя и регулировочныя приспособленія и т. д., къ этой категоріи не относятъ. Мы пока можемъ держаться болѣе общаго опредѣленія. Совершенно подобно тому, что мы имѣли въ случаѣ генераторовъ, и прочія части цѣпи могутъ соединяться послѣдовательно, параллельно, а также образовы-

вать болѣе сложныя комбинаціи въ родѣ, напримѣръ, представленной на рисункѣ 86.

Въ случаѣ *послѣдовательнаго соединенія пріемниковъ*, полное сопротивленіе, представляемое ими, какъ было указано въ § 58, слагается изъ сопротивленій всѣхъ отдѣльныхъ пріемниковъ. Обозначая черезъ r' сопротивленіе всей группы пріемниковъ, а черезъ r_1, r_2, r_3 и т. д. сопротивленіе каждаго въ отдѣльности, можемъ слѣдовательно написать:

$$r' = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots = \\ = \Sigma r.$$

Разсмотримъ далѣе *параллельное соединеніе пріемниковъ*. Рисунокъ 98 представляетъ схематически примѣръ подобнаго со-

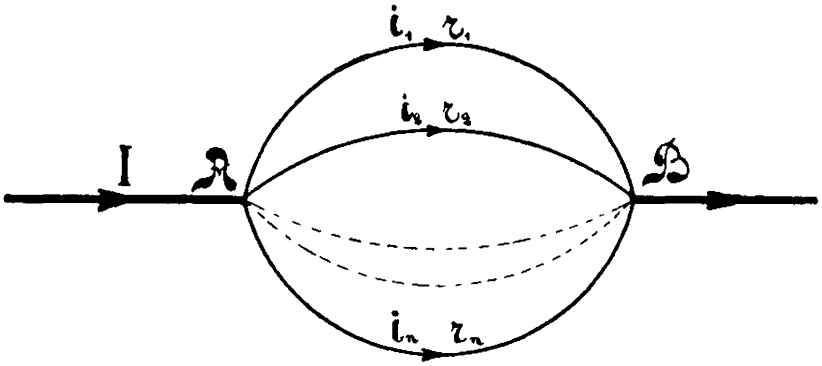


Рис. 98.

единенія. Между точками A и B въ электрической цѣпи включено n параллельныхъ вѣтвей, сопротивленія которыхъ суть r_1, r_2, r_3 и т. д. Обозначимъ токи въ нихъ черезъ i_1 i_2, i_3 и т. д., а токъ въ неразвѣтвленной части цѣпи—черезъ I. На основаніи перваго закона Кирхгофа имѣемъ:

$$I = i_1 + i_2 + \ldots + i_n = \\ = \Sigma i.$$

Но очевидно:

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1}$$

$$i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2}$$

. . . . . .

. . . . . .

$$i_n = \frac{V_A - V_B}{r}.$$

Слѣдовательно:

$$I = (V_A - V_B)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots\ldots\ldots \frac{1}{r_n}\right).$$

Мы видимъ такимъ образомъ, что для той части цѣпи, которая находится между точками A и B, сумма проводимостей отдѣльныхъ вѣтвей (§ 61):

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}$$

играетъ роль полной проводимости. Обозначивъ ее черезъ g', имѣемъ:

$$g' = \sum \frac{1}{r}.$$

Если далѣе r' есть *эквивалентное сопротивленіе* для данной группы n параллельно соединенныхъ вѣтвей, т. е. сопротивленіе такого одного проводника, который могъ бы собою замѣнить всю группу и который, значитъ, удовлетворяетъ условію:

$$I = \frac{V_A - V_B}{r'},$$

то очевидно имѣемъ:

$$r' = \frac{1}{g'} = \frac{1}{\sum \frac{1}{r}}.$$

Итакъ, можемъ сказать:

Проводимость группы параллельно соединенныхъ вѣтвей равна суммѣ проводимостей отдѣльныхъ вѣтвей.

Или:

Эквивалентное сопротивленіе группы параллельно соединенныхъ вѣтвей равно величинѣ, обратной суммѣ обратныхъ величинъ сопротивленій отдѣльныхъ вѣтвей.

Простое сопоставленіе этихъ двухъ равноцѣнныхъ опредѣленій ясно показываетъ, что въ извѣстныхъ случаяхъ примѣненіе понятія объ электрической проводимости значительно упрощаетъ описаніе явленія.

Сопоставляя теперь все вышесказанное о послѣдовательномъ и параллельномъ соединеніи пріемниковъ, мы можемъ сказать:

При послѣдовательномъ соединеніи складываются сопротивленія пріемниковъ, а при параллельномъ соединеніи складываются ихъ проводимости.

Въ частномъ случаѣ, когда сопротивленія всѣхъ параллельныхъ вѣтвей тождественны, получимъ:

$$r' = \frac{r}{n}.$$

Остановимся теперь на простѣйшемъ случаѣ параллельнаго соединенія, на случаѣ двухъ вѣтвей. Эквивалентное сопротивленіе двухъ параллельныхъ вѣтвей выразится очевидно такъ:

$$r' = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Что касается того, какимъ образомъ полный токъ I раздѣляется между данными двумя вѣтвями, то по этому поводу можно сказать слѣдующее. Ясно, что:

$$r'\mathrm{I} = r_1 i_1 = r_2 i_2.$$

Сопоставляя это съ выраженіемъ для эквивалентнаго сопротивленія, получаемъ:

$$i_1 = \mathrm{I}\frac{r_2}{r_1 + r_2},$$

$$i_2 = \mathrm{I}\frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

Раздѣляя эти два равенства одно на другое, имѣемъ:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1},$$

т. е. *силы токовъ въ отдѣльныхъ вѣтвяхъ относятся одна къ другой обратно-пропорціонально соотвѣтствующимъ сопротивленіямъ.*

Въ качествѣ примѣра, иллюстрирующаго вышесказанное, разсмотримъ вопросъ о сопротивленіи шунта амперметра или вообще какого либо гальванометра, который оказывается слишкомъ чувствительнымъ. Пусть I есть полный измѣряемый токъ

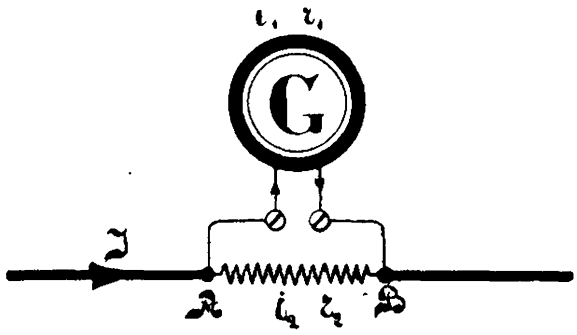


Рис. 99.

(рис. 99), i_1—токъ, протекающій черезъ гальванометръ G, и i_2 токъ въ шунтѣ AB. Пусть далѣе r_1 есть сопротивленіе гальванометра, а r_2 — сопротивленіе шунта. На основаніи предыдущаго ясно, что:

$$i_1 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

Отсюда получаемъ:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{I}{i_1} - 1.$$

Если, слѣдовательно, мы желаемъ, чтобы черезъ гальванометръ проходила только 0,001 полнаго тока I, то имѣемъ:

$$\frac{I}{i_1} = 1000$$

и далѣе:

$$\frac{r_1}{r_2} = 999.$$

Такимъ образомъ, при сопротивленіи шунта, составляющемъ:

$$\frac{1}{9}, \frac{1}{99}, \frac{1}{999} \text{ и т. д.}$$

сопротивленія гальванометра, черезъ послѣдній проходитъ:

$$\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000} \text{ и т. д.}$$

полнаго тока.

Въ качествѣ второго примѣра параллельныхъ вѣтвей разсмотримъ роль сопротивленія вольтметра V, приключаемаго къ точкамъ A и B нѣкоторой электрической цѣпи (рис. 100). Допустимъ что сопротивленіе части цѣпи AB есть r_1, а сопротивленіе вольтметра—r_2. Пусть далѣе r_0 есть сопротивленіе всѣхъ прочихъ частей цѣпи, часть

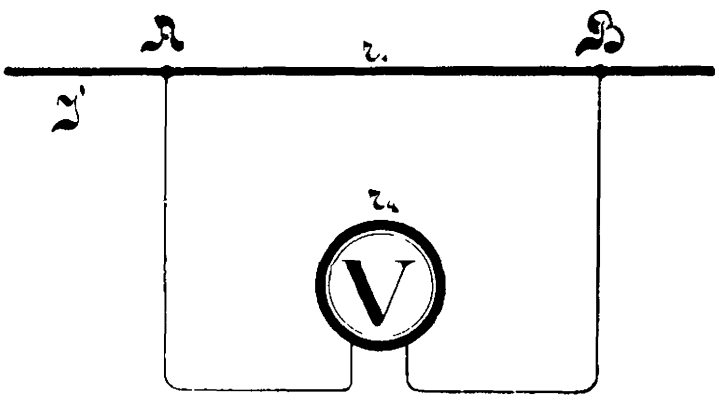


Рис. 100

которой составляетъ AB, и e—э.-д. сила, дѣйствующая въ этой цѣпи. Предположимъ сначала, что вольтметръ V еще не присоединенъ къ точкамъ A и B. Въ такомъ случаѣ имѣемъ, обозначивъ черезъ I силу тока:

$$\mathrm{I} = \frac{e}{r_0 + r_1}$$

и слѣдовательно:

$$V_A - V_B = r_1 \mathrm{I} = \frac{e r_1}{r_0 + r_1} = \frac{e}{1 + \frac{r_0}{r_1}}.$$

Приключимъ теперь вольтметръ. Вообще говоря, при этомъ должны измѣниться и сила тока въ цѣпи, и та самая разность потенціаловъ между точками A и B, которую мы желаемъ измѣрить вольтметромъ. Обозначаемъ эти величины въ такомъ случаѣ черезъ I' и $V_A' - V_B'$. Очевидно:

$$\mathrm{I}' = \frac{e}{r_0 + r'},$$

гдѣ r' есть эквивалентное сопротивленіе между точками A и B. Имѣемъ далѣе:

$$V_A' - V_B' = r' \mathrm{I}' = \frac{e r'}{r_0 + r'} = \frac{e}{1 + \frac{r_0}{r'}}.$$

Измѣненіе измѣряемой разности потенціаловъ, происшедшее вслѣдствіе приключенія вольтметра, выразится такъ:

$$\Delta V = (V_A' - V_B') - (V_A - V_B) = e\left(\frac{1}{1 + \frac{r_0}{r'}} - \frac{1}{1 + \frac{r_0}{r_1}}\right) = e r_0 \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r'}}{\left(1 + \frac{r_0}{r_1}\right)\left(1 + \frac{r_0}{r'}\right)} = \frac{e r_0}{r_1 r' \left(1 + \frac{r_0}{r_1}\right)\left(1 + \frac{r_0}{r'}\right)} (r' - r_1).$$

Отсюда мы видимъ, что ΔV будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше разность:

$$r' - r_1.$$

Ясно, что условія измѣренія разности потенціаловъ были бы идеальны, если бы:

$$\Delta V = 0.$$

При этомъ мы должны были бы имѣть:

$$r' - r_1 = 0.$$

Но мы знаемъ, что:

$$r' = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{r_1}{1 + \frac{r_1}{r_2}}.$$

Слѣдовательно, чѣмъ больше r_2, тѣмъ ближе мы будемъ къ этимъ идеальнымъ условіямъ, которыя выполняются въ точности при:

$$r_2 = \infty,$$

когда мы имѣемъ:

$$r' = r_1.$$

65. Паденіе потенціала (напряженія) въ электрической цѣпи.— Разсмотримъ сначала ту часть цѣпи, въ которой находится источникъ э.-д. силы. Пусть A и B представляютъ собою зажимы этого источника D—динамомашины или гальваническаго элемента и т. п. (рис. 101). Представимъ себѣ далѣе, что его э.-д. сила e дѣйствуетъ отъ B къ A, возбуждая въ этомъ направленіи токъ, сила котораго есть i, и обозначимъ внутреннее сопротивленіе генератора черезъ r_0. Разность потенціаловъ между точками A и B будетъ возбуждать во внѣшней части цѣпи, приключенной къ этимъ точкамъ, электрическій токъ въ направленіи отъ A къ B. Эта разность потенціаловъ, характеризующая собою разность состояній точекъ A и B, должна очевидно во всѣхъ случаяхъ стремиться возбудить токъ въ этомъ именно направленіи отъ A къ B. И слѣдовательно внутри самого генератора разность потенціаловъ $V_A - V_B$ дѣйствуетъ на-

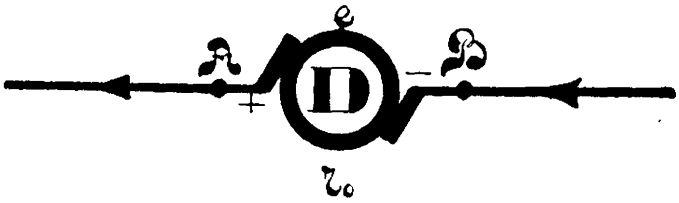


Рис. 101.

встрѣчу э.-д. силѣ e, при чемъ всетаки перевѣсъ остается на сторонѣ э.-д. силы e. Итакъ, на участкѣ цѣпи, состоящемъ изъ генератора съ сопротивленіемъ r_0, дѣйствуютъ одновременно двѣ причины, обусловливающія токъ i на этомъ участкѣ: э.-д. сила генератора e, которую мы будемъ считать положительною, такъ какъ она именно и возбуждаетъ токъ и потому, слѣдовательно, направлена такъ же, какъ и токъ, и вторая причина—разность потенціаловъ $V_A - V_B$, которая на разсматриваемомъ участкѣ дѣйствуетъ въ обратномъ направленіи и которой мы поэтому приписываемъ знакъ минусъ. Прилагая теперь законъ Ома къ этому участку, получаемъ на общемъ основаніи (§ 58):

$$i = \frac{-(V_A - V_B) + e}{r_0}.$$

Отсюда получаемъ:

$$V_A - V_B = e - r_0 i,$$

т. е. *разность потенціаловъ* $V_A - V_A$, *играющая ролъ электродвижущей силы для внѣшней цѣпи, присоединенной къ зажимамъ генератора* A *и* B, *меньше электродвижущей силы генератора на величину, представляющую собою произведеніе силы тока на внутреннее сопротивленіе генератора.*

Это произведеніе $r_0 i$ опредѣляетъ собою часть э.-д. силы e, теряемую на преодолѣніе внутренняго сопротивленія генератора и потому часто называется *потерей напряженія внутри генератора.*

Остающаяся часть э.-д. силы генератора, $V_A - V_B$, расходуется на преодолѣніе всѣхъ внѣшнихъ сопротивленій. Если мы условно примемъ, что для точки B (рис. 102) имѣетъ мѣсто:

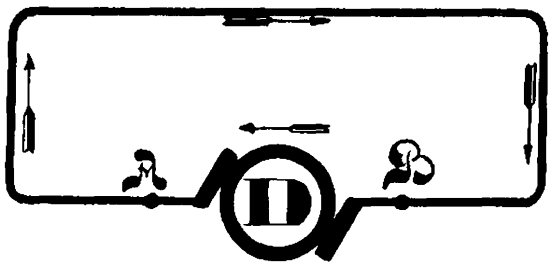


Рис. 102.

$$V_B = 0,$$

то очевидно:

$$V_A > 0.$$

Въ этомъ случаѣ потенціалы всѣхъ точекъ внѣшней цѣпи будутъ положительны, но всѣ они будутъ меньше потенціала точки A. По мѣрѣ того, какъ мы идемъ внѣ генератора отъ точки A къ точкѣ B, потенціалъ становится все меньше и меньше, *потенціалъ падаетъ* и наконецъ въ точкѣ B онъ равенъ нулю.

Въ этомъ смыслѣ разность потенціаловъ между любыми двумя точками внѣшней цѣпи является *потерей потенціала* или, какъ обыкновенно выражаются, *потерей напряженія на данномъ участкѣ.*

Измѣненіе потенціала вдоль электрической цѣпи удобно иллюстрировать особыми діаграммами. На рисункѣ 103 представлена подобная діаграмма, построенная для разсматриваемой электрической цѣпи (рис. 102). Здѣсь по оси абсциссъ откладываются сопротивленія всѣхъ частей цѣпи, начиная съ точки B въ направленіи тока. По оси ординатъ откладываемъ

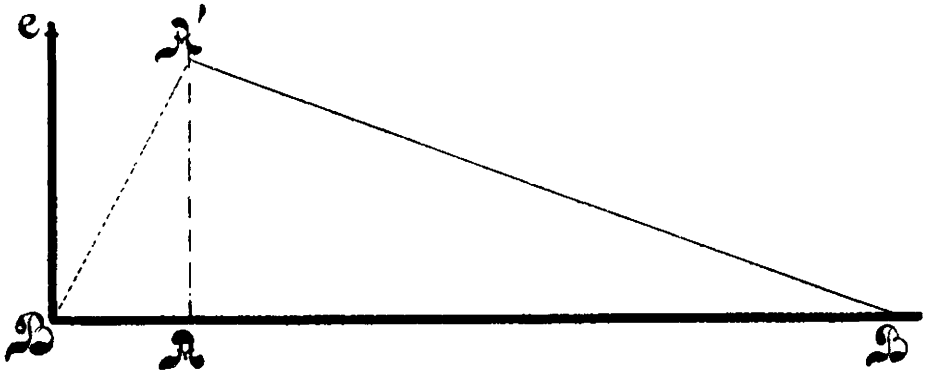


Рис. 103.

величины э.-д. силъ и разностей потенціаловъ. Кривая, характеризующая распредѣленіе потенціала, начинается отъ оси абсциссъ въ точкѣ B, ибо:

$$V_B = 0.$$

Въ части цѣпи BA, внутри генератора, потенціалъ возрастаетъ. Видъ этой части кривой, показанной пунктиромъ, въ значительной степени зависитъ отъ того, какимъ образомъ распредѣленъ внутри генератора процессъ возникновенія э.-д. силы. Итакъ, ордината AA' изображаетъ разность потенціаловъ $V_A - V_B$ и, что въ данномъ случаѣ одно и то же, потенціалъ точки A. При этомъ:

$$V_A - V_B < e.$$

Далѣе, начиная съ точки A потенціалъ во внѣшней цѣпи равномѣрно падаетъ до нуля въ точкѣ B.

Въ случаѣ, если сдѣлаемъ сопротивленіе внѣшней цѣпи равнымъ нулю, другими словами коротко соединимъ между собою зажимы нашего генератора, то очевидно:

$$V_A - V_B = 0$$

и на основаніи только что указаннаго:

$$e = r_0 i,$$

т. е. вся э.-д. сила генератора идетъ цѣликомъ на преодолѣніе внутренняго сопротивленія.

Въ этомъ отношеніи представляетъ интересъ одинъ предѣльный случай. Именно, представимъ себѣ кольцевой проводникъ (рис. 104), въ которомъ возникаетъ э.-д. сила индукціи въ условіяхъ, аналогичныхъ, скажемъ, тѣмъ, которыя изображены на рис. 57. Въ данномъ случаѣ, въ виду полной симметріи всего расположенія, мы должны заключить, что всѣ части нашего кольца принимаютъ одинаковое участіе въ пересѣченіи возникающаго или исчезающаго магнитнаго потока и, слѣдовательно, процессъ возникновенія э.-д. силы распредѣленъ совершенно равномѣрно вдоль кольца. Это значитъ, что если мы обозначимъ черезъ e э.-д. силу, индуктируемую во всемъ кольцѣ, то э.-д. силу, возникающую въ половинѣ кольца, мы должны считать равной:

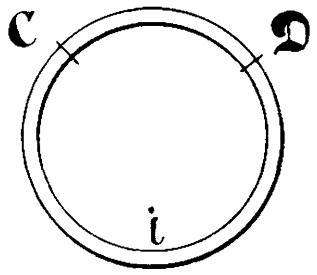


Рис. 104.

$$\frac{e}{2},$$

въ четверти кольца:

$$\frac{e}{4} \text{ и т. д.}$$

Слѣдовательно, на участкѣ CD, составляющемъ n-ую часть всего кольца, индуктируется э.-д. сила, равная:

$$\frac{e}{n}.$$

Что касается электрическаго сопротивленія кольца, то если его величина есть r, сопротивленіе n-ой части кольца есть:

$$\frac{r}{n}.$$

Прилагая законъ Ома ко всей замкнутой цѣпи кольца, имѣемъ:

$$i = \frac{e}{r},$$

или:

$$e = ri$$

Разсмотримъ теперь n-ую часть кольца, именно часть CD. Согласно предыдущему можемъ написать:

$$V_C - V_D = \frac{e}{n} - \frac{r}{n} \cdot i.$$

Но:

$$e - ri = 0$$

и, слѣдовательно:

$$\frac{e}{n} - \frac{r}{n} i = 0.$$

На этомъ основаніи получаемъ окончательно:

$$V_C - V_D = 0,$$

т. е. въ разсматриваемомъ случаѣ разность потенціаловъ между любыми двумя точками электрической цѣпи равна нулю. Другими словами, для всѣхъ точекъ цѣпи въ этомъ случаѣ:

$$V = \text{const.}$$

Въ качествѣ примѣра для иллюстраціи сказаннаго о потерѣ напряженія внутри генератора разсмотримъ вопросъ объ измѣреніи э.-д. силы генератора при помощи вольтметра. Предположимъ, что къ зажимамъ A и B генератора D, въ которомъ развивается э.-д. сила e, присоединенъ вольтметръ V (рис. 105) и при этомъ нѣтъ больше никакой другой внѣшней цѣпи или, какъ говорятъ, нагрузки. Обозначивъ черезъ i силу возникающаго въ этомъ случаѣ тока, черезъ r_0 — внутреннее сопротивленіе генератора и черезъ r — сопротивленіе вольтметра, можемъ написать на основаніи предыдущаго:

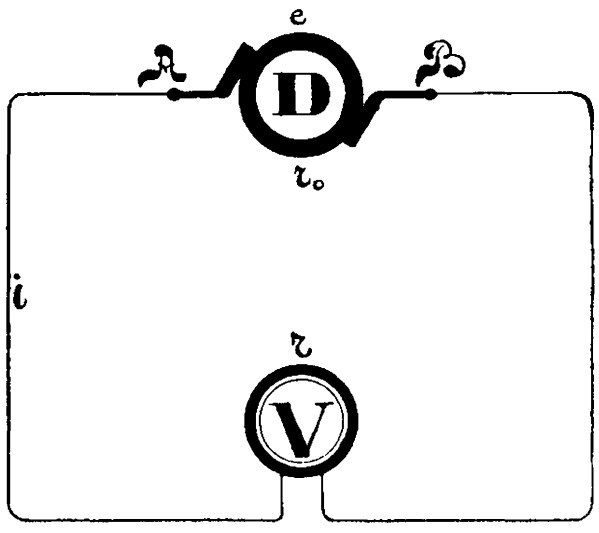


Рис. 105.

$$V_A - V_B = e - r_0 i$$

и кромѣ того:

$$i = \frac{V_A - V_B}{r}.$$

Подставляемъ это значеніе i въ первое уравненіе:

$$V_A - V_B = e - \frac{r_0}{r}(V_A - V_B)$$

и окончательно:

$$e = (V_A - V_B)\left(1 + \frac{r_0}{r}\right).$$

Отсюда мы видимъ, что если къ зажимамъ ненагруженнаго генератора присоединить вольтметръ, то показаніе послѣдняго будетъ тѣмъ ближе къ э.-д. силѣ генератора, чѣмъ больше сопротивленіе вольтметра по сравненію съ внутреннимъ сопротивленіемъ генератора. Принимая показаніе вольтметра за величину э.-д. силы, мы дѣлаемъ ошибку:

$$(V_A - V_B)\frac{r_0}{r}.$$

Такъ какъ въ огромномъ большинствѣ случаевъ сопротивленіе вольтметра бываетъ въ тысячи, десятки тысячъ разъ больше сопротивленія генератора, то, слѣдовательно, въ обычной практикѣ мы можемъ съ достаточною степенью точности измѣрять э.-д. силу вольтметромъ. Въ случаяхъ же, если отношеніе:

$$\frac{r_0}{r}$$

настолько велико, что пренебреженіе имъ повлекло бы грубую ошибку, или если по тѣмъ или инымъ соображеніямъ требуется особенная точность, то либо отдѣльно вычисляютъ поправку:

$$(V_A - V_B)\frac{r_0}{r} = r_0 i,$$

либо прибѣгаютъ къ помощи совсѣмъ другихъ методовъ измѣренія э.-д. силъ.

Въ заключеніе, опять въ видѣ примѣра, разсмотримъ вопросъ о потерѣ напряженія въ линіи, подводящей электрическую энергію къ пріемнику. Допустимъ, что A_2B_2 (рис. 106) есть пріемникъ съ сопротивленіемъ r_2, питающійся отъ генератора D, э.-д. сила котораго и внутреннее сопротивленіе $-e$ и r_0. A_1 и B_1 представляютъ собою зажимы динамомашины, къ которымъ присоединяются два провода линіи A_1A_2 и B_1B_2. Сопротивленіе каждаго

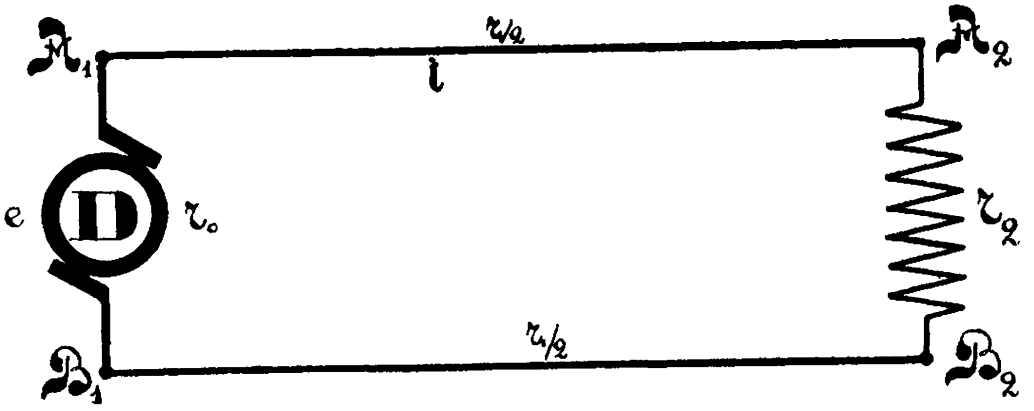


Рис. 106.

изъ этихъ проводниковъ обозначимъ черезъ $\frac{r_1}{2}$; полное же сопротивленіе всей линіи будетъ очевидно r_1. По цѣпи протекаетъ токъ, сила котораго будетъ:

$$i = \frac{e}{r_0 + r_1 + r_2}.$$

Напряженіе въ началѣ линіи, т. е. у зажимовъ A_1 и B_1, выразится слѣдующимъ образомъ:

$$V_{A_1} - V_{B_1} = e - r_0 i.$$

Вычитая изъ него потерю напряженія въ линейныхъ проводахъ, получаемъ напряженіе у зажимовъ пріемника:

$$V_{A_2} - V_{B_2} = (V_{A_1} - V_{B_1}) - (V_{A_1} - V_{A_2}) - (V_{B_2} - V_{B_1}) = \\ = (V_{A_1} - V_{B_1}) - r_1 \, i.$$

Итакъ потеря напряженія въ линіи есть:

$$\Delta e = r_1 i.$$

Выражая далѣе r_1 черезъ его геометрическіе размѣры, получаемъ:

$$r_1 = \rho \frac{l}{s},$$

гдѣ l есть двойная длина линіи передачи.

Подставляемъ это въ выраженіе для потери напряженія:

$$\Delta e = \frac{\rho l i}{s}.$$

Отсюда окончательно получаемъ:

$$s = \frac{\rho l i}{\Delta e}.$$

Послѣднее выраженіе позволяетъ разсчитать провода линіи, т. е. подобрать подходящія сѣченія ихъ, задавшись по тѣмъ или другимъ соображеніямъ величиною допустимой потери напряженія Δe.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

Тепловыя дѣйствія тока.

---

66. Нагрѣваніе проводниковъ токомъ. Законъ Джуля.—Мы уже не разъ касались вопроса о работѣ тока въ электрической цѣпи и указывали, что эта работа можетъ между прочимъ выразиться въ нагрѣваніи тѣхъ проводниковъ, изъ которыхъ составлена цѣпь. Вещество проводниковъ принимаетъ нѣкоторое участіе въ процессѣ, называемомъ нами электрическимъ токомъ, что выражается зависимостью сопротивленія цѣпи отъ природы вещества. Въ виду этого и въ случаѣ электрическаго тока проявляется основное свойство всякаго вещества, всякой матеріальной среды. Совершенно независимо отъ характера того или иного кинетическаго процесса матеріальная среда, принимающая въ немъ участіе, всегда поглощаетъ всю или хотя бы часть энергіи системы. Какъ результатъ этого является эквивалентное увеличеніе количества тепла въ системѣ: матеріальныя части ея нагрѣваются. И во всякой электрической цѣпи при прохожденіи тока проводники обыкновенно нагрѣваются. Въ случаѣ, когда токъ не совершаетъ никакой механической работы и вообще не преодолѣваетъ никакихъ противодѣйствующихъ, обратныхъ э.-д. силъ, вся электрическая энергія, развиваемая генераторомъ, расходуется цѣликомъ на нагрѣваніе проводниковъ цѣпи. Для того, чтобы сосредоточить свое вниманіе именно на нагрѣваніи проводниковъ токомъ, мы предположимъ, что имѣемъ какъ разъ такой случай. Если мы станемъ измѣрять количество тепла, выдѣляемаго въ проводникахъ, обычными единицами работы, напримѣръ джулями, то очевидно выраженіе для электрической работы и представитъ

собою это количество тепла. Вообразимъ себѣ проводникъ съ сопротивленіемъ r, по которому проходитъ токъ силою i подъ вліяніемъ разности потенціаловъ $V_A - V_B$ между концами. Обозначая количество тепла черезъ Q' и работу черезъ A, получимъ въ этомъ случаѣ:

$$Q' = A = \\ = (V_A - V_B)\ i\ t,$$

гдѣ t есть время, въ теченіе котораго это тепло выдѣлилось.

Ясно, что, пользуясь закономъ Ома, мы можемъ представить это выраженіе и въ другихъ формахъ:

$$Q' = \frac{(V_A - V_B)^2}{r}\ t = \\ = ri^2t.$$

Если же мы пожелаемъ выразить количество тепла въ особыхъ тепловыхъ единицахъ—калоріяхъ, то въ эти соотношенія придется ввести еще нѣкоторый коэффиціентъ пропорціональности. Обозначимъ его черезъ c. Пусть далѣе Q есть количество тепла въ *малыхъ калоріяхъ*. Въ такомъ случаѣ можемъ написать:

$$Q = c\ (V_A - V_B)\ it = \\ = c\ \frac{V_A - V_B^{\ 2}}{r}\ t = \\ = cri^2t.$$

Послѣднее соотношеніе изъ этого ряда было установлено чисто экспериментально Джулемъ и нѣсколько позже, совершенно независимо отъ него, Ленцомъ. По имени перваго оно обычно называется *закономъ Джуля*, а то тепло, которое выдѣляется въ проводникахъ благодаря ихъ сопротивленію, нерѣдко называютъ *тепломъ Джуля*.

Итакъ законъ Джуля гласитъ, что *количество тепла, развиваемаго электрическимъ токомъ въ проводникѣ, прямо-пропорціонально сопротивленію проводника, квадрату силы тока и времени*.

Опредѣлимъ теперь значеніе коэффиціента c. Q малыхъ калорій равны 0,001 Q большимъ калоріямъ и эквивалентны 0,425 Q килограммметрамъ. Далѣе, на основаніи § 50, имѣемъ:

ri^2t джулей $= 0{,}102\ ri^2t$ килограммметрамъ.

Поэтому можемъ написать:

$$0{,}425Q = 0{,}102\, ri^2t.$$

Слѣдовательно:

$$c = \frac{0{,}102}{0{,}425} = \\ = 0{,}24.$$

Такимъ образомъ:

$$Q = 0{,}24\,(V_A - V_B)\,it = \\ = 0{,}24\,\frac{(V_A - V_B)^2}{r}\,t = \\ = 0{,}24\ ri^2t.$$

Соединивъ въ цѣпи послѣдовательно нѣсколько проволокъ—напримѣръ желѣзныхъ—разнаго діаметра и пропуская по нимъ токъ, мы увидимъ, что въ то время какъ тонкія проволоки накалятся, скажемъ, до краснаго каленія, толстыя едва-едва нагрѣются. Это объясняется тѣмъ, что сопротивленіе, приходящееся на единицу длины проволоки, будетъ обратно-пропорціонально квадрату діаметра, и слѣдовательно въ этомъ же отношеніи будетъ измѣняться въ зависимости отъ діаметра и количество тепла, выдѣляемаго въ данномъ случаѣ за нѣкоторый промежутокъ времени на единицѣ длины проволоки. Подобнымъ же образомъ, если въ цѣпь введены проволоки одинаковаго діаметра, но однѣ изъ желѣза, другія изъ мѣди, то желѣзныя проволоки накалятся до-красна, въ то время какъ мѣдныя останутся еще темными. И это имѣетъ мѣсто несмотря на то, что теплоемкость желѣза нѣсколько больше теплоемкости мѣди. Подобное различіе теплоемкостей съ избыткомъ покрывается значительной разницей удѣльныхъ сопротивленій желѣза и мѣди (см. § 60).

Обстоятельствомъ, характеризующимъ тепло Джуля, является то, что количество его совершенно не зависитъ отъ направленія тока. Это слѣдуетъ изъ всѣхъ вышеприведенныхъ соотношеній, гдѣ мы имѣли либо квадраты разности потенціаловъ или силы тока, либо произведеніе этихъ двухъ величинъ, одинаково въ данномъ случаѣ направленныхъ.

67. Приложенія тепловыхъ дѣйствій тока.—Нагрѣваніе проводниковъ токомъ, являясь неизбѣжнымъ результатомъ тѣхъ общихъ условій, при которыхъ протекаетъ электрокинетическій процессъ, весьма часто разсматривается, какъ обстоятельство,

безполезно поглощающее энергію. Въ такихъ случаяхъ обыкновенно принимаются мѣры къ тому, чтобы уменьшить насколько возможно это нагрѣваніе. Такъ напримѣръ въ случаѣ электрическаго генератора или электродвигателя, въ случаѣ проводниковъ, передающихъ электрическую энергію отъ генератора къ пріемнику, и т. п. стараются сдѣлать электрическое сопротивленіе какъ можно меньше и только экономическія или конструктивныя соображенія кладутъ предѣлъ въ этомъ отношеніи. Есть однако не мало примѣровъ и обратнаго. На практикѣ нагрѣваніе проводниковъ электрическимъ токомъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ используется, какъ явленіе, необходимое для осуществленія того или иного эффекта. Въ нижеслѣдующихъ строкахъ мы вкратцѣ остановимся на нѣкоторыхъ изъ подобныхъ примѣровъ.

Наиболѣе распространеннымъ въ настоящее время приборомъ, въ которомъ мы пользуемся нагрѣваніемъ проводника токомъ, является несомнѣнно *электрическая лампа накаливанія.* Устройство ея въ общихъ чертахъ состоитъ въ слѣдующемъ. Тонкая нить, изготовляемая особымъ способомъ изъ угля или изъ такихъ тугоплавкихъ металловъ, какъ танталъ, вольфрамъ и другіе, изгибается въ формѣ петли или какъ нибудь иначе и помѣщается внутри стекляннаго сосуда, изъ котораго выкачанъ воздухъ (рис. 107). Воздухъ выкачивается съ одной стороны для того, чтобы предотвратить окисленіе или другіе возможные химическіе процессы у поверхности накаленной нити, и съ другой стороны съ цѣлью ухудшить теплопроводность окружающаго нить пространства и получить такимъ образомъ возможность достигнуть необходимой температуры каленія нити при наименьшей расходуемой на это мощности. Для подведенія тока къ нити концы ея присоединяютъ къ сравнительно хорошо проводящимъ проволокамъ, впаяннымъ въ нижнюю съуженную часть стекляннаго сосуда, снаружи которой располагаются металлическія контактныя части, служащія для прикрѣпленія лампы къ спеціальнымъ поддерживающимъ устройствамъ—люстрамъ, бра и т. д.— и для включенія лампы въ электрическую цѣпь. При пропусканіи черезъ лампу тока, нить ея доводится до бѣлаго каленія и

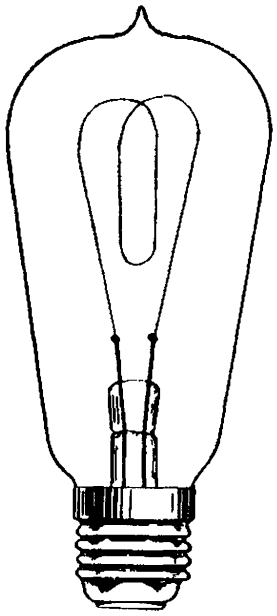


Рис. 107.

излучаетъ свѣтъ. Въ данномъ случаѣ, какъ и во всѣхъ другихъ случаяхъ устанавившагося нагрѣванія проводниковъ токомъ, температура соотвѣтствуетъ условіямъ подвижного равновѣсія въ тепловомъ процессѣ: количество тепла, выдѣляемаго токомъ въ нѣкоторый промежутокъ времени, въ точности равно количеству тепла, теряемаго благодаря излученію за тотъ же промежутокъ времени.

Въ качествѣ слѣдующаго примѣра практическаго примѣненія нагрѣванія проводниковъ токомъ приведемъ такъ называемые *плавкіе предохранители*, включаемые обычно въ различныхъ мѣстахъ электрической цѣпи и въ мѣстахъ всѣхъ отвѣтвленій отъ нея съ тою цѣлью, чтобы сила тока не могла сдѣлаться чрезмѣрно большой благодаря какой-либо несчастной случайности, напримѣръ порчѣ изоляціи между проводами и т. п. Предохранители включать необходимо потому, что слишкомъ сильный токъ можетъ вызвать такое нагрѣваніе, на которое не разсчитаны и котораго не выдержатъ генераторы и другія части цѣпи. Въ качествѣ плавкихъ предохранителей примѣняютъ небольшіе отрѣзки проволоки, діаметръ которой въ каждомъ частномъ случаѣ подбираютъ такимъ образомъ, чтобы она плавилась, какъ только сила тока выйдетъ болѣе или менѣе за нормальный предѣлъ. Съ цѣлью безопасности въ пожарномъ отношеніи въ обычной практикѣ чаще всего примѣняютъ предохранители изъ легкоплавкихъ металловъ, какъ напримѣръ свинецъ, или особые легкоплавкіе сплавы.

Остановимся теперь на тѣхъ случаяхъ, когда тепло, развиваемое токомъ, является конечною цѣлью нѣкотораго устройства. Сюда относятся всевозможныя грѣлки, электрическія печи и т. д. Весьма, напримѣръ, распространены различныя приспособленія для согрѣванія воды и для варки кушаній. Устройство всѣхъ подобнаго рода грѣлокъ сводится къ тому, что располагаютъ возможно ближе къ стѣнкамъ металлическаго сосуда, внутрь котораго наливается, допустимъ, вода, хорошо изолированную проволоку, сильно нагрѣваемую проходящимъ черезъ нее токомъ. Кромѣ того принимаются, конечно, еще мѣры противъ потерь тепла наружу. Пусть, напримѣръ, требуется разсчитать электрическую часть грѣлки, которая должна въ теченіи 10 минутъ согрѣвать 2 литра воды отъ 10° до температуры кипѣнія, и допустимъ, что эта грѣлка будетъ присоединена къ сѣти съ напряженіемъ въ 110 вольтовъ между проводами. Въ

первомъ приближеніи мы можемъ пренебречь теплоемкостью сосуда и проволоки, а также потерею тепла на сторону. Въ такомъ случаѣ количество тепла, которое надо развить, выразится слѣдующимъ образомъ:

$$Q = 2000 \cdot 90 =$$
$$= 180\ 000 \text{ м. калорій.}$$

На основаніи соотношенія:

$$Q = 0{,}24 \frac{(V_A - V_B)^2}{r} t$$

можемъ написать, подставивъ сюда соотвѣтствующія значенія входящихъ величинъ:

$$180\ 000 = 0{,}24 \frac{110^2}{r} 600 .$$

Отсюда получаемъ:

$$r = 9{,}68 \text{ ома.}$$

Выбравъ матеріалъ для проволоки грѣлки и зная его удѣльное сопротивленіе, нетрудно подобрать соотвѣтствующіе длину и діаметръ проволоки. При этомъ необходимо еще считаться съ тѣмъ, чтобы температура проволоки не достигала значенія, угрожающаго какъ самой проволокѣ, такъ и изоляціи. Въ этомъ отношеніи приходится руководствоваться опытомъ или составленными на основаніи предварительныхъ опытовъ таблицами допустимыхъ плотностей тока (отношеній силы тока къ сѣченію провода) для разныхъ случаевъ.

Итакъ, грѣлка, удовлетворяющая поставленнымъ выше условіямъ, будетъ брать отъ сѣти токъ силою:

$$i = \frac{110}{9{,}68} =$$
$$= 11{,}36 \text{ амперъ.}$$

и будетъ расходовать мощность:

$$W = 110 \cdot 11{,}36 =$$
$$= 1250 \text{ ваттовъ} =$$
$$= 1{,}25 \text{ киловатта.}$$

Электрическая же энергія, потребленная грѣлкою въ теченіе 10 минутъ, будетъ равна:

$$A = 1{,}25 \cdot \frac{10}{60} =$$
$$= 0{,}28 \text{ киловаттъ-часа.}$$

Къ разсматриваемой категоріи примѣненій электричества слѣдуетъ отнести и электрическую сварку, производимую слѣдующимъ образомъ. Свариваемыя поверхности двухъ кусковъ металла прикладываютъ одну къ другой, крѣпко сдавливаютъ и черезъ мѣста соприкосновенія пропускаютъ настолько сильный токъ (иногда десятки, сотни тысячъ амперъ), что выдѣляющееся джулево тепло быстро расплавляетъ металлъ въ мѣстѣ контакта. Сильное давленіе обусловливаетъ при этомъ весьма тѣсное сближеніе свариваемыхъ предметовъ и въ результатѣ получается очень прочное соединеніе.

Джулевымъ же тепломъ пользуются иногда для расплавленія металла и въ нѣкоторыхъ металлургическихъ процессахъ (печи Челлина и т. п.).

Къ области тепловыхъ дѣйствій тока отнесемъ и такъ называемую *вольтову дугу*, которая можетъ быть получена въ цѣпи всякаго достаточно мощнаго генератора, обладающаго къ тому же достаточно большой э.-д. силой. Для возникновенія дуги необходимо имѣть въ цѣпи перерывъ. Сначала сближаютъ до соприкосновенія *электроды*, ограничивающіе этотъ перерывъ; при этомъ обыкновенно весьма быстро накаливаются части электродовъ въ области контакта, благодаря большому сопротивленію въ этомъ мѣстѣ. Раздвигая затѣмъ электроды, получаютъ токъ черезъ газообразный промежутокъ въ видѣ огненной дуги. Въ этомъ случаѣ мы встрѣчаемся съ примѣромъ прохожденія тока черезъ газъ, обычно разсматриваемый, какъ хорошій изоляторъ. Есть, однако, цѣлый рядъ условій, при которыхъ газъ дѣлается проводящимъ. Между прочимъ, высокая температура самого газа или хотя бы электродовъ, ограничивающихъ его, можетъ обусловить прохожденіе тока черезъ газъ, какъ это и имѣетъ мѣсто въ вольтовой дугѣ. Мощность, поглощаемая вольтовой дугой, бываетъ довольно велика, что въ связи съ небольшими сравнительно геометрическими размѣрами области дуги имѣетъ обычно слѣдствіемъ чрезвычайно высокую температуру въ этой области и, между прочимъ, сильное каленіе концовъ электродовъ дуги. Этимъ объясняется примѣненіе вольтовой дуги для освѣщенія, а также для разнаго рода металлургическихъ и химическихъ процессовъ.

Упомянувъ затѣмъ о такихъ примѣненіяхъ нагрѣванія проводника токомъ, какъ электрокаустика (въ области хирургіи) и взрываніе минъ, познакомимся въ заключеніе съ устройствомъ

тепловыхъ измѣрительныхъ приборовъ. Въ приборахъ этой системы измѣряемый токъ пропускается по спеціальному, извѣстнымъ образомъ натянутому, проводнику, геометрическіе размѣры котораго подбираются такъ, чтобы токъ могъ замѣтно повысить его температуру. Очевидно при этомъ увеличивается длина проводника. Далѣе, въ зависимости отъ конструкціи прибора примѣняютъ то или другое приспособленіе, при помощи котораго измѣненіе длины проводника вызываетъ перемѣщеніе стрѣлки прибора. Ясно, что при неизмѣнности внѣшнихъ условій каждому значенію силы тока будетъ соотвѣтствовать строго опредѣленное положеніе стрѣлки на шкалѣ прибора. На рисункѣ

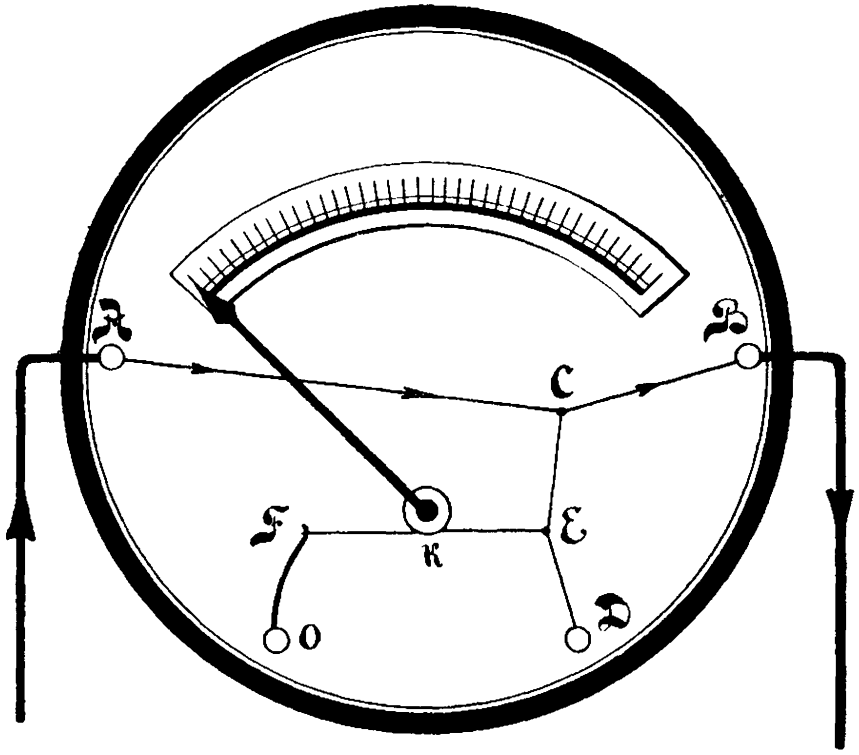


Рис. 108.

108 показано устройство весьма распространенныхъ тепловыхъ измѣрительныхъ приборовъ фирмы Гартманъ и Браунъ. Измѣряемый токъ пропускается черезъ проволоку AB, изготовляемую изъ спеціально подобраннаго сплава. Проволока эта прочно закрѣплена въ точкахъ A и B, а въ точкѣ C оттягивается книзу особой проволочкой CD, закрѣпленной въ точкѣ D. Наконецъ проволочка CD въ свою очередь оттягивается въ точкѣ E влѣво гибкой проволочкой EF, перекинутой черезъ блокъ K и оттягиваемой пружиной FO. Само собою понятно, что при пропусканіи тока проволока AB нагрѣется, удлинится и оттянется книзу въ точкѣ C. Сближеніе точекъ C и D позволитъ точкѣ E подвинуться влѣво подъ дѣйствіемъ пружины

FO. При этомъ повернется блокъ *K* и перемѣстится на шкалѣ связанная съ нимъ стрѣлка. Описываемой комбинаціей проволочекъ достигается то, что весьма незначительное измѣненіе длины проволоки *AB* влечетъ за собою очень большое перемѣщеніе стрѣлки. Объясняется это чисто геометрически тѣмъ, что во всякомъ прямоугольномъ треугольникѣ съ очень малымъ острымъ угломъ катетъ, противолежащій этому углу, претерпѣваетъ значительныя измѣненія при самыхъ ничтожныхъ измѣненіяхъ длины гипотенузы. Приборы разсмотрѣннаго типа строются, какъ амперметры и какъ вольтметры.

68. Явленіе Пельтье.—Тепло Джуля не является единственной возможной формой тепловыхъ дѣйствій электрическаго тока въ цѣпи. Отличительной особенностью другихъ формъ оказывается то, что явленіе зависитъ отъ направленія тока. Къ этой области относится явленіе, открытое *Пельтье* и заключающееся въ томъ, что въ случаѣ, когда электрическая цѣпь состоитъ изъ нѣсколькихъ разнородныхъ соприкасающихся другъ съ другомъ проводниковъ, хотя бы исключительно металлическихъ, при прохожденіи тока въ мѣстахъ спаевъ наблюдается выдѣленіе или поглощеніе тепла въ зависимости отъ направленія тока. Обычно это явленіе наблюдается не особенно рѣзко, такъ какъ оно налагается на основной тепловой процессъ—выдѣленіе джулева тепла. Сущность явленія Пельтье заключается въ слѣдующемъ. Въ мѣстахъ соприкосновенія разнородныхъ тѣлъ вслѣдствіе какого-то неизвѣстнаго намъ взаимодѣйствія между этими тѣлами возникаетъ открытая *Вольтою* э.-д. сила, такъ называемая *контактная электродвижущая сила*, направленная отъ одного тѣла къ другому. Въ обычныхъ условіяхъ мы не замѣчаемъ въ электрической цѣпи дѣйствія контактныхъ э.-д. силъ, такъ какъ алгебраическая сумма ихъ, распространенная на весь контуръ цѣпи, равна нулю, если только однако температуры всѣхъ спаевъ одинаковы. Послѣднее условіе зависитъ отъ того, что величина контактной э.-д. силы есть, между прочимъ, функція температуры. Когда температуры спаевъ неодинаковы, въ цѣпи начинаетъ дѣйствовать разность отдѣльныхъ контактныхъ э.-д. силъ, названная нами выше (см. § 47) термоэлектродвижущей силой. Если же будемъ пропускать токъ отъ посторонняго генератора черезъ нашу составную цѣпь, то, очевидно, контактныя э.-д. силы будутъ въ однихъ мѣстахъ содѣйствовать этому току, въ другихъ же онѣ

будутъ дѣйствовать навстрѣчу ему, стремясь его ослабить. На распредѣленіи потенціала вдоль проводника это отразится въ томъ отношеніи, что въ мѣстахъ контактовъ съ содѣйствующими э.-д. силами мы получимъ внезапныя повышенія потенціала, скачки потенціала вверхъ какъ разъ на величину этихъ э.-д. силъ, а въ мѣстахъ контактовъ съ противодѣйствующими э.-д. силами мы будемъ имѣть внезапныя потери потенціала, скачки потенціала внизъ. На рисункѣ 109 представлена діаграмма, иллюстрирующая сказанное о паденіи потенціала вдоль цѣпи, составленной изъ разнородныхъ матеріаловъ. Спаю A соотвѣтствуетъ приращеніе потенціала, т. е. этотъ спай играетъ роль генератора; спаю же B соотвѣтствуетъ пониженіе потен-

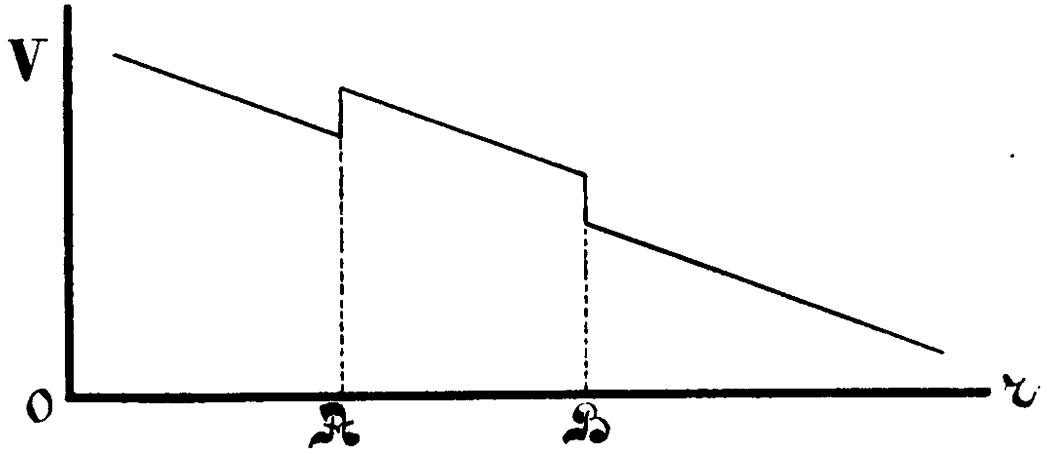


Рис. 109.

ціала, другими словами въ спаѣ B тратится электрическая энергія. Пельтье показалъ, что въ спаѣ A тепло поглощается, а въ спаѣ B—выдѣляется. Количество тепла, поглощаемаго въ спаѣ A, эквивалентно электрической энергіи, развивающейся въ этомъ мѣстѣ, а количество тепла, появляющагося въ спаѣ B, эквивалентно электрической энергіи, расходуемой въ этомъ мѣстѣ. Если обозначимъ черезъ e' нѣкоторую контактную э.-д. силу, то количество тепла, развиваемаго въ мѣстѣ контакта при прохожденіи тока i въ теченіе времени t, будетъ:

$$Q_p = -0{,}24e'it,$$

при чемъ знакъ зависитъ отъ направленія тока. Направленіе же э.-д. силы e' въ данномъ спаѣ остается неизмѣннымъ.

Что касается величины контактныхъ э.-д. силъ, обусловливающихъ явленіе Пельтье, то онѣ сравнительно невелики. Порядокъ ихъ опредѣляется десятыми долями вольта.

69. Явленіе Томсона.—Въ тѣсной связи съ явленіемъ Пельтье стоитъ явленіе, открытое *В. Томсономъ*. Послѣдній показалъ,

что въ проводникѣ, сдѣланномъ изъ одного матеріала, но различныя точки котораго имѣютъ неодинаковую температуру, происходитъ явленіе той же категоріи, какъ и явленіе Пельтье. Представимъ себѣ, напримѣръ, мѣдный проводникъ, концы котораго поддерживаются при низкой температурѣ, а середина нагрѣта. Въ этомъ случаѣ оказывается, что вдоль проводника болѣе или менѣе равномѣрно распредѣлены э.-д. силы, направленныя отъ концовъ къ серединѣ. Онѣ возникаютъ вслѣдствіе того, что различные поперечные слои проводника, находясь при разныхъ температурахъ, будутъ обладать неодинаковыми физическими свойствами и потому на границахъ ихъ раздѣла появятся э.-д. силы, какъ и при соприкосновеніи разнородныхъ металловъ. Поэтому при пропусканіи электрическаго тока черезъ данный неравномѣрно нагрѣтый проводникъ въ его первой половинѣ тепло будетъ поглощаться и выдѣляться во второй половинѣ. Для желѣза получается какъ разъ обратное явленіе. Въ этомъ металлѣ возникаютъ э.-д. силы, направленныя отъ мѣстъ нагрѣтыхъ къ мѣстамъ холоднымъ. Поэтому въ первой половинѣ желѣзнаго проводника происходитъ выдѣленіе и во второй—поглощеніе тепла при томъ же направленіи тока и при томъ же распредѣленіи температуръ, что и въ случаѣ опыта съ мѣднымъ проводникомъ. Все происходитъ, слѣдовательно, такъ, какъ будто бы въ мѣди тепло переносится въ направленіи тока, а въ желѣзѣ наоборотъ. Чтобы обнаружить это явленіе на опытѣ, надо пропускать токъ черезъ какой либо стержень, концы котораго поддерживаются, напримѣръ, при 0°, а середина нагрѣта. Тогда въ двухъ точкахъ, симметрично расположенныхъ относительно середины, температура окажется неодинаковою. Для однихъ металловъ (какъ напримѣръ мѣдь, серебро, цинкъ, кадмій, сюрьма) кажущійся переносъ теплоты совершается въ направленіи тока, а для другихъ металловъ (желѣзо, олово, алюминій, платина, висмутъ) — обратно току. Въ свинцѣ явленіе Томсона почти совсѣмъ незамѣтно.

Должно имѣть въ виду, что описываемое явленіе, какъ и явленіе Пельтье, практически выражено обычно весьма нерѣзко, ибо на эти явленія всегда накладывается гораздо болѣе интенсивное при нормальныхъ условіяхъ явленіе выдѣленія джулева тепла. Нужны бываютъ спеціальныя мѣры, чтобы ослабить послѣднее явленіе и дать возможность наблюдать первое.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

Перемѣнный режимъ въ электрической цѣпи.

---

70. Прекращеніе постояннаго тока.—Представимъ себѣ электрическую цѣпь съ сопротивленіемъ r и коэффиціентомъ самоиндукціи L (рис. 110). Пусть внѣшняя э.-д. сила, дѣйствующая

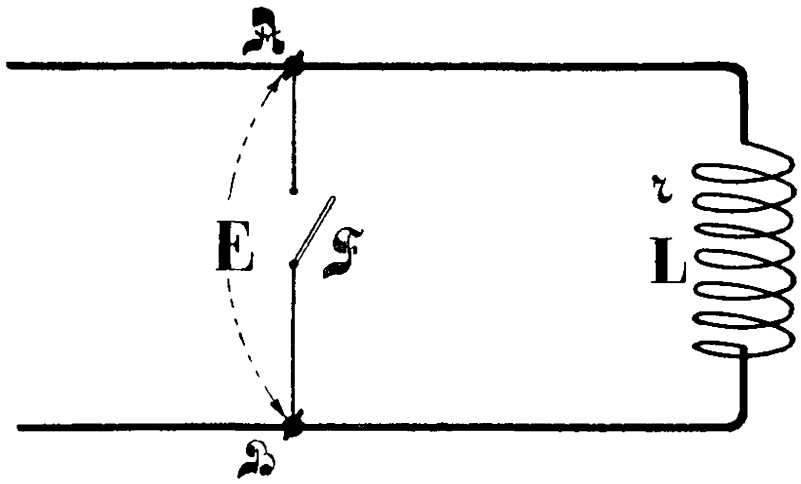


Рис. 110.

между зажимами A и B этой цѣпи, равна E. Другими словами, мы принимаемъ, что:

$$V_A - V_B = E.$$

Сила постояннаго тока, протекающаго по цѣпи, выразится согласно закону Ома:

$$I = \frac{E}{r}.$$

Допустимъ теперь, что въ то время, какъ по цѣпи протекаетъ этотъ токъ I, мы уничтожимъ э.-д. силу E. Это мы мо-

жемъ сдѣлать, напримѣръ, коротко соединивъ между собою концы нашей цѣпи A и B, пользуясь для этой цѣли рубильникомъ F. Итакъ замыкаемъ этотъ рубильникъ. Казалось бы, что при:

$$V_A - V_B = 0$$

мы не имѣемъ въ цѣпи условій для поддержанія тока и что онъ долженъ прекратиться тотчасъ же послѣ замыканія рубильника F. Однако электромагнитная инерція цѣпи, характеризуемая коэффиціентомъ самоиндукціи L, не допускаетъ того, чтобы установившійся кинетическій процессъ — электрическій токъ—мгновенно прекратился. Послѣ замыканія рубильника F токъ въ нашей цѣпи продолжаетъ существовать. Его поддерживаетъ э.-д. сила самоиндукціи:

$$-L\frac{di}{dt},$$

которая отсутствовала, пока токъ сохранялъ свою силу, и появилась, какъ только токъ началъ ослабѣвать по причинѣ отсутствія внѣшней э.-д. силы. Электромагнитная инерція не позволяетъ, такимъ образомъ, току сразу прекратиться. Однако она не можетъ сохранить первоначальную силу тока I въ обычныхъ условіяхъ, когда сопротивленіе цѣпи r имѣетъ конечное значеніе. Это сопротивленіе мало по малу поглощаетъ запасъ энергіи тока въ нашей цѣпи и сила тока постепенно уменьшается, приближаясь къ предѣлу—нулю. Все происходитъ совершенно аналогично тому, что мы можемъ наблюдать во всякой матеріальной системѣ, когда внезапно исчезаетъ внѣшняя механическая сила, поддерживавшая нѣкоторое установившееся движеніе. Въ этомъ случаѣ инерція матеріальныхъ частей системы не позволяетъ движенію прекратиться. Оно продолжается и послѣ прекращенія дѣйствія внѣшней силы. Въ обычныхъ условіяхъ въ силу того сопротивленія, которое матеріальная среда оказываетъ всякому происходящему въ ней движенію, движеніе по инерціи не можетъ продолжаться безпредѣльно. Кинетическая энергія системы—живая сила движущихся частей ея — мало по малу поглотится сопротивленіями, пойдетъ на нагрѣваніе частей системы и движеніе въ концѣ концовъ прекратится.

Разсмотримъ теперь, какъ измѣняется съ теченіемъ времени сила тока послѣ замыканія рубильника F, т. е. послѣ выключенія изъ цѣпи дѣйствовавшей въ ней э.-д. силы. Во все это

время въ цѣпи будетъ существовать только э.-д. сила самоиндукціи, и потому можемъ написать согласно закону Ома:

$$i = \frac{-L\frac{di}{dt}}{r}$$

или:

$$ri = -L\frac{di}{dt}$$

и далѣе:

$$L\frac{di}{dt} + ri = 0.$$

Рѣшивъ это уравненіе, мы очевидно узнаемъ, какъ измѣняется i съ теченіемъ времени. Раздѣляя перемѣнныя, получаемъ:

$$\frac{di}{i} = -\frac{r}{L}\cdot dt.$$

Слѣдовательно:

$$\log\frac{i}{K} = -\frac{r}{L}t,$$

откуда:

$$i = K\varepsilon^{-\frac{r}{L}t}.$$

Здѣсь ε есть основаніе натуральныхъ логариѳмовъ, а K — постоянная интегрированія.

Величину постоянной K въ настоящемъ случаѣ мы можемъ опредѣлить, ибо намъ извѣстны начальныя условія. Дѣйствительно полагаемъ:

$$t = 0.$$

Тогда имѣемъ:

$$i = K.$$

Но въ начальный моментъ въ цѣпи была сила тока I. Такимъ образомъ, для этого момента имѣетъ мѣсто слѣдующее:

$$i = K = I = \frac{E}{r}.$$

Въ результатѣ получаемъ полное рѣшеніе въ такомъ видѣ:

$$i = \frac{E}{r} \varepsilon^{-\frac{r}{L} t}.$$

Теоретически:

$$i = 0,$$

при:

$$t = \infty.$$

Практически же токъ довольно быстро совершенно исчезаетъ, такъ какъ обычно численное значеніе сопротивленія весьма велико по сравненію съ коэффиціентомъ самоиндукціи и слѣдовательно отношеніе:

$$\frac{r}{L}$$

очень велико.

На рисункѣ 111 представленъ графически законъ измѣненія i съ теченіемъ времени. Здѣсь по оси ординатъ отклады-

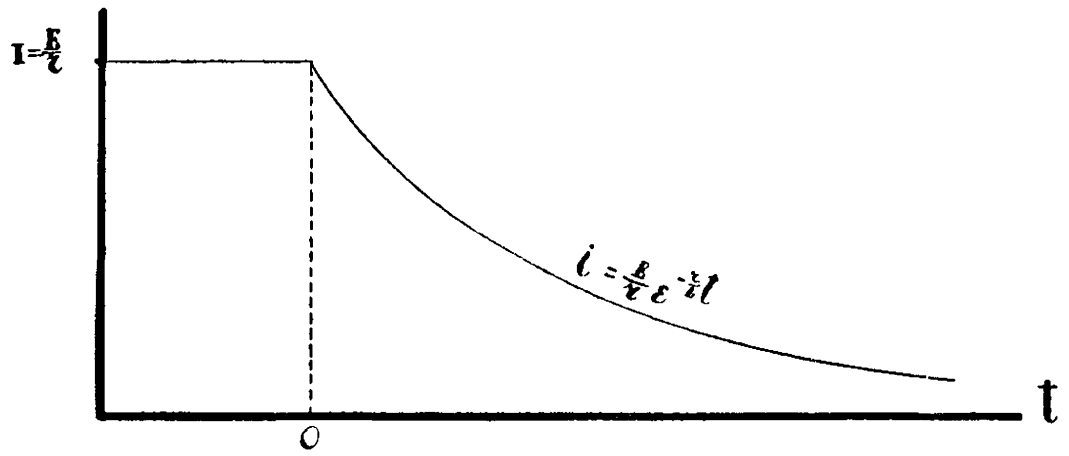


Рис. 111.

ваются значенія силы тока, а вдоль оси абсциссъ — время. Точка 0 соотвѣтствуетъ моменту выключенія внѣшней э.-д. силы.

Разсмотрѣнная нами схема цѣпи (рис. 110) является скорѣе теоретической, чѣмъ такой, съ которой нормально приходится встрѣчаться на практикѣ. Обычно для прекращенія тока въ цѣпи производятъ разрывъ въ этой цѣпи (рис. 112). Это равносильно внезапному увеличенію сопротивленія цѣпи. И здѣсь электромагнитная инерція не допускаетъ мгновеннаго прекращенія тока. Соотвѣтственно очень быстрому ослабленію тока возникаетъ очень значительная э.-д. сила самоиндукціи, которая обыкновенно оказывается достаточной для того, чтобы превоз-

мочь большое сопротивленіе, представляемое воздухомъ въ мѣстѣ перерыва. Въ результатѣ въ этомъ мѣстѣ наблюдается искра, являющаяся одной изъ формъ прохожденія тока черезъ воздухъ или вообще газообразную среду. Задача о разысканіи закона, по которому сила тока измѣняется въ этомъ случаѣ съ теченіемъ времени, весьма усложняется, потому что все время, пока длится искра, цѣпь остается замкнутой посредствомъ сопротивленія измѣнчиваго и въ значительной степени неизвѣстнаго. Иногда при перерывѣ тока въ цѣпи съ большой самоиндукціей сопротивленіе изоляціи между крайними частями данной цѣпи — напримѣръ между точками A' и B' (рис. 112)—оказы-

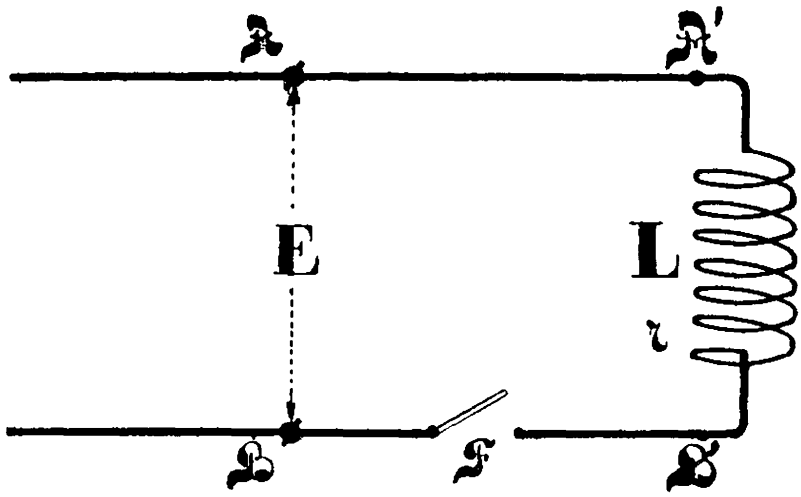


Рис. 112.

вается меньше сопротивленія газовъ въ мѣстѣ перерыва и въ такомъ случаѣ изоляція между A' и B' пробивается. Подобное разрушеніе изоляціи нерѣдко сопровождается свариваніемъ металлическихъ проводниковъ между собою въ мѣстѣ перерыва изоляціи и далѣе въ образовавшейся замкнутой цѣпи явленіе протекаетъ согласно правой части діаграммы, представленной на рисункѣ 111.

Токъ, возникающій благодаря появленію э. д. силы самоиндукціи, иногда называютъ *экстра-токомъ*. Въ разсматриваемомъ нами случаѣ мы имѣемъ, слѣдовательно, дѣло съ *экстра-токомъ размыканія*.

71. Установленіе постояннаго тока.—Допустимъ, что мы замыкаемъ рубильникомъ F цѣпь, представленную на рис. 112. Если между зажимами A и B этой цѣпи поддерживается постоянная разность потенціаловъ E, то сила тока, который долженъ въ концѣ концовъ установиться, будетъ:

$$I = \frac{E}{r}.$$

Однако токъ достигнетъ этого значенія не сразу благодаря противодѣйствію со стороны электромагнитной инерціи системы. Все происходитъ и въ данномъ случаѣ совершенно подобно тому, что наблюдается въ матеріальной системѣ, когда внѣшняя механическая сила начинаетъ дѣйствовать на покоившееся дотолѣ нѣкоторое тѣло. Въ начальный моментъ скорость равна нулю и сразу не можетъ достичь окончательнаго значенія, опредѣляемаго соотношеніемъ между внѣшней силой и сопротивленіями, оказываемыми движенію окружающею средою. Въ зависимости отъ инерціи тѣла скорость болѣе или менѣе быстро возрастаетъ и только по прошествіи нѣкотораго промежутка времени достигаетъ предѣла. И въ электрической цѣпи скорость электрокинетическаго процесса—сила тока—въ моментъ замыканія цѣпи всегда равна нулю. Въ этотъ моментъ, слѣдовательно, э. д. сила самоиндукціи вполнѣ скомпенсировываетъ дѣйствіе внѣшней э.-д. силы E. При этомъ скорость наростанія тока будетъ наибольшая. Но мало по малу она уменьшается. Уменьшается вмѣстѣ съ тѣмъ и противодѣйствующая э. д. сила самоиндукціи. Сила же тока все возрастаетъ и въ концѣ концовъ достигаетъ предѣльнаго значенія I въ то время, какъ э.-д. сила самоиндукціи дѣлается равной нулю.

Попытаемся въ данномъ случаѣ разыскать законъ измѣненія силы тока съ момента замыканія цѣпи. Въ каждый моментъ времени въ нашей цѣпи, очевидно, дѣйствуютъ двѣ э.-д. силы: внѣшняя э.-д. сила и э.-д. сила самоиндукціи. Алгебраическая сумма ихъ будетъ:

$$E - L\frac{di}{dt}$$

и, слѣдовательно, сила тока въ любой моментъ времени выразится такъ:

$$i = \frac{E - L\frac{di}{dt}}{r}.$$

Преобразовавъ это, получимъ:

$$L\frac{di}{dt} + ri = E.$$

Для полученія рѣшенія этого дифференціальнаго уравненія, раздѣляемъ перемѣнныя:

$$\frac{di}{i - \frac{E}{r}} = -\frac{r}{L} \cdot dt,$$

откуда находимъ:

$$\log \frac{1}{K}\left(i - \frac{E}{r}\right) = -\frac{r}{L} t.$$

Слѣдовательно:

$$i = \frac{E}{r} + K\varepsilon^{-\frac{r}{L}t} =$$

$$= I + K\varepsilon^{-\frac{r}{L}t}.$$

Постоянную K можемъ опредѣлить изъ начальныхъ условій. Дѣйствительно въ моментъ времени:

$$t = 0$$

мы должны имѣть:

$$i = 0.$$

Такимъ образомъ, получаемъ:

$$K = -I.$$

И окончательно:

$$i = I - I\,\varepsilon^{-\frac{r}{L}t} =$$

$$= I\left(1 - \varepsilon^{-\frac{r}{L}t}\right) =$$

$$= \frac{E}{r}\left(1 - \varepsilon^{-\frac{r}{L}t}\right).$$

На рисункѣ 113 этотъ результатъ представленъ графически. Въ моментъ замыканія цѣпи:

$$i = 0.$$

Затѣмъ съ теченіемъ времени сила тока возрастаетъ, ассимптотически приближаясь къ значенію I, показанному горизонтальной пунктирной линіей. И это происходитъ тѣмъ медленнѣе, чѣмъ больше при томъ же r коэффиціентъ самоиндукціи L. Теоретически условіе:

$$i = \frac{E}{r}$$

достигается лишь при:

$$t = \infty.$$

Практически же обычно благодаря соотношенію между сопротивленіемъ цѣпи и коэффиціентомъ самоиндукціи очень быстро достигается предѣльное значеніе для силы тока, и мы получаемъ въ цѣпи установившійся постоянный токъ по прошествіи небольшой доли секунды. Можно однако создать и такую цѣпь,

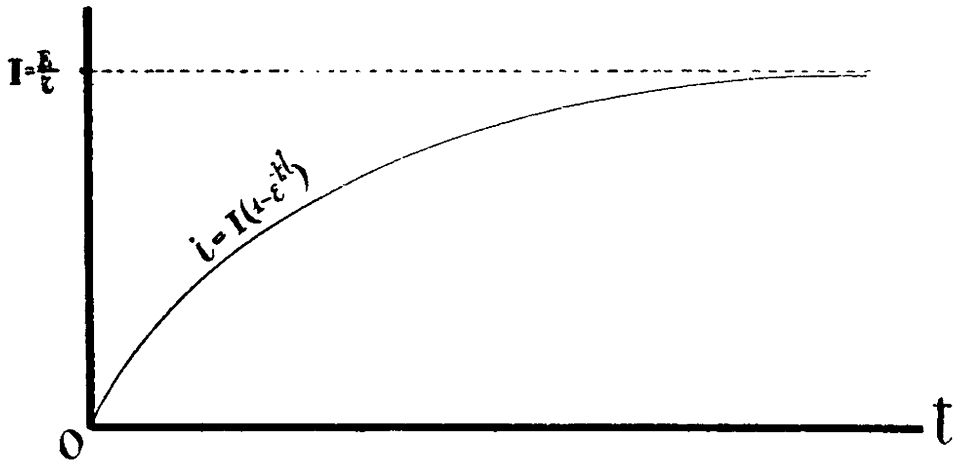


Рис. 113.

въ которой при сравнительно небольшомъ сопротивленіи коэффиціентъ самоиндукціи будетъ настолько великъ, что періодъ установленія тока длится секундами. На рисункѣ 114 показана схема опыта, принадлежащаго А. С. Попову и наглядно иллюстрирующаго запаздываніе въ установленіи тока, вызываемое электромагнитною инерціею. Къ зажимамъ цѣпи A и B, между

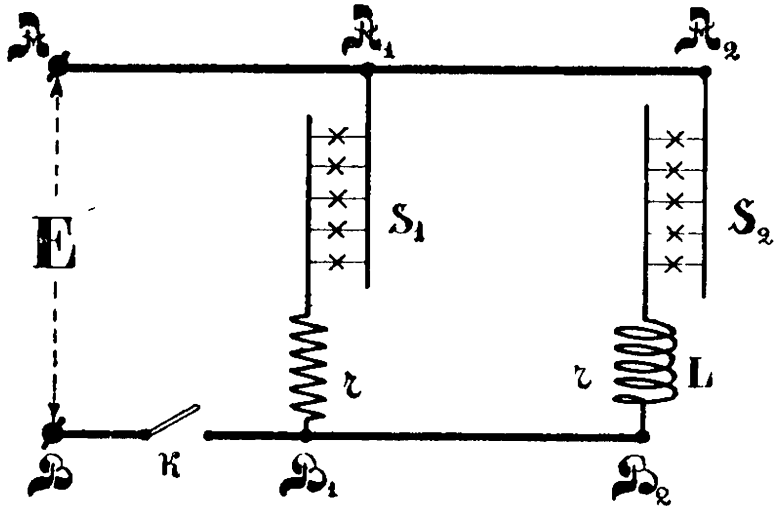


Рис. 114.

которыми дѣйствуетъ внѣшняя э. д. сила E, черезъ посредство рубильника K приключаются двѣ параллельныя вѣтви A_1B_1 и A_2B_2. Въ каждой изъ этихъ вѣтвей помѣщены совершенно одинаковыя группы лампъ накаливанія S_1 и S_2, соединенныхъ параллельно для уменьшенія общаго сопротивленія. Кромѣ того

въ вѣтви A_1B_1 послѣдовательно съ лампами S_1 включенъ обычный реостатъ съ сопротивленіемъ r. Практически коэффиціентъ самоиндукціи этого реостата ничтожно малъ и имъ можно пренебречь. Во второй же вѣтви A_2B_2 послѣдовательно съ лампами S_2 помѣщается катушка, обладающая тѣмъ же сопротивленіемъ r, но состоящая изъ большого числа витковъ съ желѣзнымъ сердечникомъ, что дѣлаетъ коэффиціентъ самоиндукціи катушки очень большимъ. Итакъ мы имѣемъ двѣ параллельныя вѣтви съ тождественными сопротивленіями, электромагнитная же инерція этихъ вѣтвей не одинакова: въ одной она ничтожно мала, въ другой, наоборотъ, велика. Вслѣдствіе этого получается такого рода явленіе. Послѣ замыканія рубильника K лампы S_1 сразу нормально накаливаются, между тѣмъ какъ лампы S_2 зажигаются медленно, такъ что можно наблюдать послѣдовательно всѣ степени каленія, и лишь по прошествіи весьма замѣтнаго промежутка времени яркость горѣнія лампъ S_2 сравнивается съ лампами S_1. Ясно конечно, что въ описываемомъ опытѣ лампы играютъ роль простого указателя силы тока. Въ вѣтви A_1B_1 токъ устанавливается очень быстро, быть можетъ въ продолженіе какой либо сотой доли секунды, и потому лампы въ этой вѣтви зажигаются очень быстро. Совсѣмъ иначе обстоитъ дѣло въ вѣтви A_2B_2. Здѣсь большая электромагнитная инерція сильно тормозитъ установленіе тока; онъ возрастаетъ очень медленно, что мы обнаруживаемъ, наблюдая за лампами S_2. Опытъ этотъ можно произвести еще и въ такой формѣ. Если, замкнувъ рубильникъ K, немедленно его выключить, затѣмъ вновь включить и т. д., и если при этомъ непрерывно повторяющіеся періоды прекращенія тока будутъ весьма непродолжительны, то лампы S_1 будутъ все время оставаться въ накаленномъ состояніи, и лишь легкое миганіе будетъ отмѣчать моменты кратковременныхъ размыканій тока, а лампы S_2 будутъ оставаться совершенно темными, такъ какъ токъ въ цѣпи A_2B_2 не будетъ успѣвать достигнуть замѣтной силы за время замыканія. Все происходитъ, слѣдовательно, такъ, какъ будто бы сопротивленіе вѣтви A_2B_2 было больше сопротивленія вѣтви A_1B_1. И, собственно говоря, можно разсматривать противодѣйствующую э.-д. силу, возникающую въ этомъ случаѣ въ вѣтви A_2B_2, какъ причину, обусловливающую возрастаніе *полнаго сопротивленія*, оказываемаго этой вѣтвью прохожденію по ней измѣняющагося тока. Ставъ на такую точку зрѣнія, мы,

конечно, должны далѣе разсуждать такъ, какъ будто въ нашей цѣпи съ самоиндукціей дѣйствуетъ одна лишь внѣшняя э. д. сила, ибо э.-д. силу самоиндукціи мы уже учитываемъ, считая сопротивленіе бо̀льшимъ. Подобный способъ разсужденія обычно примѣняется при изученіи и описаніи явленій, происходящихъ въ цѣпи перемѣннаго тока.

72. Накопленіе энергіи въ электрической цѣпи при установленіи тока.—За все время установленія тока въ цѣпи связь между э.-д. силами, дѣйствующими въ этой цѣпи, выражается соотношеніемъ (см. предыдущій §):

$$E = ri + L\frac{di}{dt}.$$

Смыслъ этого соотношенія заключается въ слѣдующемъ. Въ любой моментъ времени внѣшняя э.-д. сила E раздѣляется на двѣ части. Первая часть есть:

$$ri.$$

Эта часть внѣшней э.-д. силы расходуется на преодолѣніе сопротивленія r, *омическаго сопротивленія*, какъ иногда выражаются.

Вторая часть:

$$L\frac{di}{di},$$

обратная по знаку э.-д. силѣ самоиндукціи, есть часть внѣшней э.-д. силы, идущая на преодолѣніе этой э.-д. силы самоиндукціи, возникающей вслѣдствіе возрастанія магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ данной цѣпи.

Умножимъ теперь обѣ части нашего основного уравненія на idt.

Получаемъ:

$$Ei\,dt = ri^2dt + Li\,di.$$

Лѣвая часть полученнаго уравненія представляетъ собою полную работу, совершенную въ электрической цѣпи внѣшней э.-д. силой E за безконечно малый промежутокъ времени dt. Правая часть состоитъ изъ двухъ членовъ. Первый изъ нихъ:

$$ri^2dt$$

очевидно есть не что иное, какъ джулево тепло, выдѣлившееся въ цѣпи за время dt. Второй же членъ:

$$Li\,di$$

свидѣтельствуетъ намъ, что за время установленія тока помимо нагрѣванія проводника въ цѣпи совершалась еще какая-то работа. Это очевидно есть работа, потраченная на измѣненіе состоянія системы—на созданіе магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ тока, ибо эта работа совершена э.-д. силой, преодолѣвавшей реакцію возникающаго магнитнаго потока. Опредѣлимъ теперь полную работу, пошедшую на созданіе этого потока съ момента замыканія цѣпи до полнаго установленія тока. Съ этою цѣлью намъ, очевидно, надо просуммировать всѣ члены вида:

$$Li\,di,$$

начиная съ:

$$i = 0$$

и кончая:

$$i = I,$$

гдѣ черезъ I мы по прежнему обозначаемъ силу установившагося постояннаго тока.

Произведемъ это суммированіе графически. Будемъ вдоль оси абсциссъ (рис. 115) откладывать силу тока i, а вдоль оси ординатъ величину потока самоиндукціи, т. е.

$$Li.$$

При условіи постоянства коэффиціента самоиндукціи связь между этимъ потокомъ и силой тока выразится графически въ

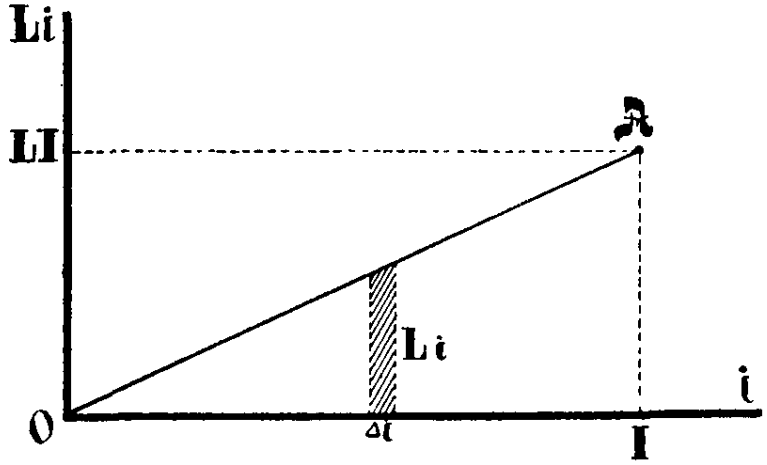


Рис. 115.

видѣ прямой линіи OA. Заштрихованная элементарная площадка, поверхность которой съ нѣкоторой степенью точности можно принять равной:

$$Li \cdot \Delta i,$$

представляетъ собою работу, соотвѣтствующую приращенію тока на конечную величину:

$$\Delta i.$$

Подобной же площадкой, но только съ безконечно малымъ основаніемъ di, изобразится графически и безконечно малая работа:

$$Li\,di.$$

Ясно такимъ образомъ, что искомая сумма всѣхъ такихъ отдѣльныхъ слагаемыхъ изобразится площадью прямоугольнаго треугольника, одинъ катетъ котораго есть I, а другой $=LI$. Величина этой площади будетъ:

$$\frac{1}{2} LI^2.$$

Это и есть искомая работа, запасаемая въ электрической цѣпи за время установленія тока I и сохраняемая въ системѣ въ видѣ энергіи магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ тока. Эта энергія не исчезаетъ безслѣдно при прекращеніи тока. Она проявляется въ видѣ энергіи тока, индуктируемаго либо въ данной же цѣпи, либо въ какой-нибудь сосѣдней. Въ разсматриваемомъ случаѣ все происходитъ опять совершенно аналогично тому, что наблюдается въ матеріальныхъ системахъ. Когда подъ дѣйствіемъ внѣшней механической силы нѣкоторое тѣло переходитъ изъ состоянія покоя въ состояніе движенія, то во все время до достиженія наибольшей скорости — скорости установившагося равномѣрнаго движенія — внѣшняя сила должна съ одной стороны совершать работу тренія, обусловливаемую сопротивленіемъ среды, съ другой стороны — работу увеличенія кинетической энергіи даннаго тѣла, живой силы его. Эта вторая работа запасается въ системѣ и величина запаса энергіи есть живая сила тѣла:

$$\frac{1}{2} mu^2,$$

гдѣ m — масса тѣла, а u — скорость установившагося движенія. Послѣ того какъ движеніе установилось, живая сила сохраняется неизмѣнно, ни въ чемъ не обнаруживаясь, внѣшняя же механическая сила идетъ исключительно на преодолѣніе сопро-

тивленія среды. Но какъ только перестаетъ дѣйствовать внѣшняя сила, тотчасъ же проявляется живая сила тѣла — его кинетическая энергія. За счетъ этого запаса энергіи движеніе въ системѣ нѣкоторое время поддерживается, пока запасъ не исчерпается сопротивленіемъ среды.

Разсматриваемая аналогія дополняется еще и чисто формальнымъ сходствомъ, какое существуетъ между выраженіями запаса энергіи въ цѣпи электрическаго тока и живой силы движущагося тѣла. Оба выраженія составлены вполнѣ тождественнымъ образомъ изъ коэффиціентовъ инерціи (L, m) и скоростей (I, u). Согласно представленію Максвелля выраженіе:

$$\frac{1}{2}LI^2$$

есть *электрокинетическая энергія* цѣпи тока, т. е. энергія того кинетическаго процесса, каковымъ мы должны считать электрическій токъ. Иногда эту энергію называютъ *внутренней энергіей* тока.

73. Возникновеніе перемѣнной электродвижущей силы.—Разсмотримъ условія возникновенія э.-д. силы въ альтернаторѣ, теоретическая схема котораго, обслѣдованная въ общихъ чертахъ въ § 24, воспроизведена вновь на рисункѣ 116. Магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ виткомъ $ABCD$, періодически измѣняется по величинѣ и направленію. Въ связи съ этимъ въ виткѣ индуктируется перемѣнная э.-д. сила. Если обозначимъ потокъ сквозь контуръ витка черезъ ϕ, а э.-д. силу въ виткѣ черезъ e, то можемъ написать на общемъ основаніи:

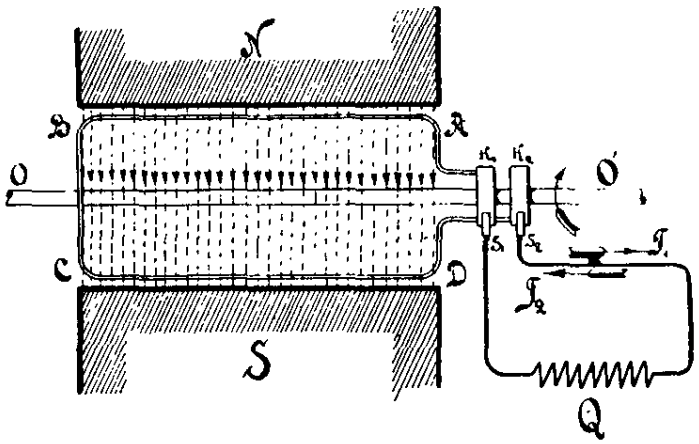


Рис. 116.

$$e = -\frac{d\phi}{dt}.$$

Преобразуемъ это выраженіе э.-д. силы, установивъ предварительно законъ, согласно которому ϕ мѣняется съ теченіемъ

времени. Пусть рисунокъ 117 представляетъ собою разрѣзъ нашего альтернатора плоскостью, перпендикулярною оси. Положеніе витка въ пространствѣ будемъ опредѣлять угломъ α, образуемымъ плоскостью витка и плоскостью, перпендикулярною къ направленію магнитнаго потока. Очевидно магнитный потокъ, сцѣпляющійся съ виткомъ, будетъ имѣть наибольшее значеніе при условіи:

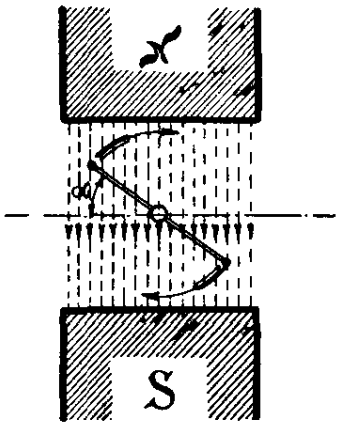


Рис. 117.

$$\alpha = 0.$$

Ясно также, что въ случаѣ, если поле между полюсами N и S можно считать однороднымъ, будетъ имѣть мѣсто слѣдующее соотношеніе:

$$\beta = \Phi \cos \alpha,$$

гдѣ Φ есть наибольшее значеніе потока.

Въ такомъ случаѣ имѣемъ:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\Phi \sin\alpha \frac{d\alpha}{dt}$$

и потому:

$$e = \Phi \sin\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt}.$$

Практически вращеніе альтернатора происходитъ съ постоянною угловою скоростью. Обозначая ее черезъ ω, получаемъ:

$$\alpha = \omega t$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega.$$

Слѣдовательно:

$$e = \omega\Phi \sin \omega t.$$

Въ данномъ случаѣ

$$\omega\Phi$$

представляетъ собою наибольшее значеніе э.-д. силы. Въ виду этого обозначаемъ:

$$\omega\Phi = E$$

и окончательно получаемъ:

$$e = E \sin \omega t.$$

Итакъ, мы видимъ, что э.-д. сила, возникающая въ нашемъ альтернаторѣ, измѣняется съ теченіемъ времени по закону синусовъ. Такую э.-д. силу называютъ *гармоническою электродвижущею силою*. Въ практически осуществляемыхъ альтернаторахъ перемѣнная э.-д. сила оказывается нерѣдко болѣе сложною функціей времени. Однако въ огромномъ большинствѣ случаевъ съ достаточною степенью приближенія можно бываетъ допустить, что во всѣхъ подобныхъ альтернаторахъ возникаетъ гармоническая э.-д. сила. Въ виду этого при теоретическомъ изученіи явленій, происходящихъ въ цѣпи перемѣннаго тока, въ основу кладется простѣйшій случай, когда въ цѣпи дѣйствуетъ гармоническая э.-д. сила.

Введемъ еще нѣсколько обозначеній. Именно, пусть N есть число оборотовъ арматуры нашего альтернатора въ одну секунду, а T есть время полнаго оборота этого теоретическаго альтернатора. Ясно, что:

$$N = \frac{1}{T}$$

и вмѣстѣ съ тѣмъ:

$$\omega = 2\pi N = \frac{2\pi}{T}.$$

Принимая во вниманіе эти обозначенія, мы получаемъ слѣдующій рядъ равнозначущихъ выраженій для гармонической э.-д. силы:

$$e = E \sin \omega t = E \sin 2\pi N t = E \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Входящія сюда величины носятъ обыкновенно спеціальныя названія. Именно:

e есть *мгновенное значеніе э.-д. силы*,
E — *амплитуда э.-д. силы*,
ωt — *фаза э.-д. силы*,
ω — *угловая скорость*,
N — *частота, число періодовъ въ одну секунду*,
T — *время полнаго періода*.

На рисункѣ 118 гармоническая э.-д. сила представлена графически. Здѣсь по оси абсциссъ откладывается время или величина ему прямо-пропорціональная:

$$\alpha = \omega t,$$

т. е. фаза. По оси ординатъ откладывается э.-д. сила. Получающаяся кривая носитъ названіе *синусоиды*. Послѣдовательныя

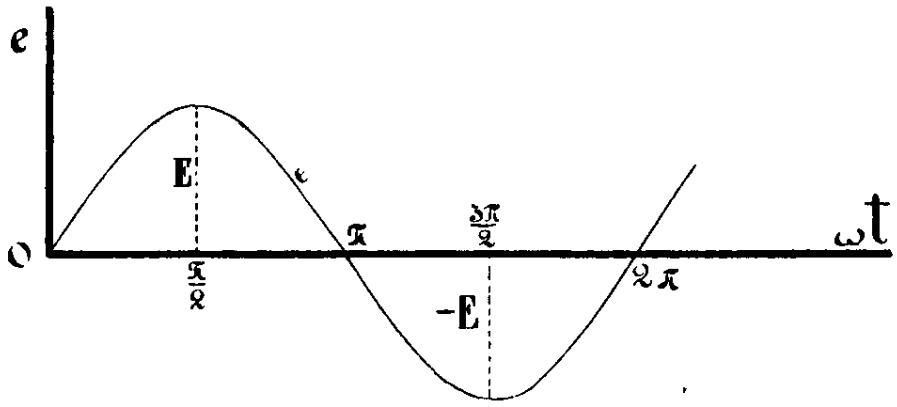


Рис. 118.

стадіи, проходимыя измѣняющеюся э.-д. силой за время полнаго періода, таковы.

Въ моментъ:

$$t = 0$$

имѣемъ:

$$\omega t = 0$$

и, слѣдовательно:

$$e = 0,$$

т. е. кривая э.-д. силы исходитъ изъ начала координатъ 0.

Съ теченіемъ времени э.-д. сила пріобрѣтаетъ положительныя значенія, которыя все возрастаютъ до момента:

$$t = \frac{T}{4},$$

когда фаза имѣетъ значеніе:

$$\omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} =$$

$$= \frac{\pi}{2}$$

и э.-д. сила равна:

$$e = E \sin \frac{\pi}{2}$$

$$= E,$$

т. е. въ этотъ моментъ э.-д. сила имѣетъ наибольшее значеніе.

Далѣе съ теченіемъ времени э.-д. сила начинаетъ убывать и, наконецъ, въ моментъ:

$$t = \frac{T}{2},$$

фаза дѣлается равной:

$$\omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} =$$

$$= \pi$$

и э.-д. сила падаетъ до нуля:

$$e = E \sin \pi =$$
$$= 0.$$

Такимъ образомъ, за время перваго полуперіода э.-д. сила принимаетъ всевозможныя положительныя значенія отъ 0 до E и обратно до 0. Въ теченіе второго полуперіода всѣ эти значенія вновь повторяются, но только съ обратнымъ знакомъ. При возрастаніи t, начиная съ

$$\frac{T}{2},$$

э.-д. сила дѣлается отрицательной, при чемъ по абсолютной величинѣ она возрастаетъ до момента:

$$\frac{3T}{4},$$

когда фаза равна:

$$\omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4} =$$

$$= \frac{3\pi}{2}.$$

Въ этотъ моментъ э.-д. сила равна:

$$e = E \sin \frac{3\pi}{2} =$$

$$= -E.$$

Въ послѣднюю четверть періода э.-д. сила уменьшается по абсолютной величинѣ, все время оставаясь отрицательной и, наконецъ, въ моментъ:

$$t = T$$

фаза дѣлается равной:

$$\omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot T =$$

$$= 2\pi$$

и э.-д. сила снова падаетъ до нуля:

$$e = E \sin 2\pi =$$
$$= 0.$$

Затѣмъ все повторяется вновь. Въ этомъ отношеніи послѣдующіе періоды ничѣмъ не отличаются отъ перваго.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ сопоставлены всѣ вышеприведенныя значенія t, ωt и e.

Время t	Фаза ωt	Э.-д. сила e
0	0	0
$0 < t < \frac{T}{4}$	$0 < \omega t < \frac{\pi}{2}$	$0 < e < E$
$\frac{T}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	E
$\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$	$\frac{\pi}{2} < \omega t < \pi$	$E > e > 0$
$\frac{T}{2}$	π	0
$\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$	$\pi < \omega t < \frac{3\pi}{2}$	$0 > e > -E$
$\frac{3T}{4}$	$\frac{3\pi}{2}$	$-E$
$\frac{3T}{4} < t < T$	$\frac{3\pi}{2} < \omega t < 2\pi$	$-E < e < 0$
T	2π	0

74. Перемѣнный токъ въ цѣпи съ сопротивленіемъ и самоиндукціей.—Представимъ себѣ цѣпь съ сопротивленіемъ r и коэффиціентомъ самоиндукціи L (рис. 119), между зажимами которой дѣйствуетъ гармонически измѣняющаяся внѣшняя э.-д. сила:

$$e = E \sin \omega t.$$

Въ данномъ случаѣ r и L показаны въ цѣпи совершенно отдѣльно. Это иногда дѣлается на схемахъ, когда желательно сосредоточить вниманіе отдѣльно на каждомъ изъ свойствъ цѣпи. Надо только понимать, что это дѣлается совершенно условно. Какъ сопротивленіе цѣпи, такъ и вся ея самоиндукція распредѣляются вдоль всей цѣпи и отдѣлить ихъ одно отъ другого на самомъ дѣлѣ, конечно, невозможно.

Итакъ, въ нашей цѣпи дѣйствуетъ гармоническая э.-д. сила и возбуждаетъ токъ i. Такъ какъ э.-д. сила непрерывно измѣняется, то ясно, что и сила тока будетъ непрерывно измѣ-

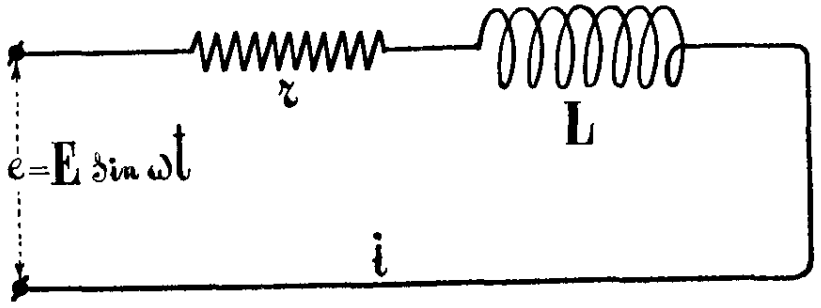


Рис. 119.

няться. Обратимся теперь къ вопросу о томъ, какъ выражается эта сила тока въ любой моментъ времени. Въ цѣпи всегда будутъ дѣйствовать, собственно говоря, двѣ э.-д. силы: внѣшняя э.-д. сила e и э.-д. сила самоиндукціи:

$$-L\frac{di}{dt}.$$

Поэтому можемъ написать:

$$i = \frac{\Sigma e}{r}$$

$$= \frac{e - L\frac{di}{dt}}{r}.$$

Преобразовавъ и подставивъ вмѣсто e его значеніе, получаемъ:

$$L\frac{di}{dt} + ri = E\sin\omega t.$$

Полное рѣшеніе этого уравненія имѣетъ значеніе только при изслѣдованіи явленій, происходящихъ непосредственно послѣ замыканія цѣпи. Но практически очень быстро эти явленія за-

канчиваются и измѣненія силы тока начинаютъ слѣдовать весьма простому закону, наступаетъ *установившійся режимъ въ цѣпи перемѣннаго тока*. Зависимость между силою тока и временемъ въ этомъ случаѣ представляетъ собою частное рѣшеніе вышеприведеннаго уравненія. Разыскать частное рѣшеніе этого уравненія можно различными способами. Мы это сдѣлаемъ на основаніи изслѣдованія отдѣльныхъ членовъ, входящихъ въ составъ уравненія. Правая часть его представляетъ собою синусоидальную функцію времени. Въ лѣвой части мы имѣемъ сумму двухъ функцій времени:

$$ri$$

и

$$L\frac{di}{dt}.$$

Если теперь принять во вниманіе, что всякую синусоидальную функцію времени можно разсматривать, какъ сумму любого числа синусоидальныхъ функцій того же періода, и что въ составъ одного члена лѣвой части уравненія входитъ сила тока, а въ составъ другого—ея производная,—мы должны придти къ заключенію, что частнымъ рѣшеніемъ даннаго уравненія можетъ быть синусоидальная функція времени съ періодомъ T. Производная этой функціи есть тоже синусоидальная функція и, такимъ образомъ, имѣемъ въ лѣвой части сумму двухъ синусоидальныхъ функцій времени съ періодомъ T. Необходимо только соотвѣтствующимъ образомъ подобрать амплитуду и фазу тока для того, чтобы уравненіе удовлетворялось этимъ рѣшеніемъ. Амплитуду тока можемъ условно обозначить черезъ I, а что касается фазы тока, то также условно пока можемъ ее представить въ видѣ:

$$\omega t - \varphi,$$

гдѣ черезъ φ мы обозначаемъ возможную *разность фазъ* э.-д силы и тока, ибо единственное, что мы должны принять, какъ обязательный результатъ предшествующихъ разсужденій, есть утвержденіе, что періодъ тока и э.-д. силы долженъ быть одинъ и тотъ же. Итакъ, полагаемъ:

$$i = I\sin(\omega t - \varphi).$$

Подставивъ это выраженіе для тока въ наше уравненіе, мы убѣдимся, что послѣднее дѣйствительно можетъ быть удовлетворено

данным рѣшеніемъ при надлежащемъ подборѣ постоянныхъ I и φ. Та же подстановка даетъ намъ возможность опредѣлить и величины этихъ постоянныхъ. Ясно, что:

$$\frac{di}{dt} = \omega I \cos(\omega t - \varphi).$$

Подставляя это, а также выраженіе для i въ основное уравненіе, получаемъ:

$$L\omega I \cos(\omega t - \varphi) + rI \sin(\omega t - \varphi) = E \sin \omega t.$$

Разлагаемъ теперь cos и sin разности угловъ:

$$L\omega I(\cos \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \sin \varphi) + rI(\sin \omega t \cdot \cos \varphi - \cos \omega t \cdot \sin \varphi) = \\ = E \sin \omega t.$$

Собирая члены съ $\cos \omega t$ и съ $\sin \omega t$, получаемъ:

$$(\omega LI \cos \varphi - rI \sin \varphi) \cos \omega t + (\omega LI \sin \varphi + rI \cos \varphi - E) \sin \omega t = 0.$$

Такъ какъ $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ могутъ имѣть въ широкихъ предѣлахъ произвольныя значенія, то для удовлетворенія послѣдняго уравненія необходимо, чтобы постоянные коэффиціенты при cos и sin были равны нулю, т. е. должно быть:

$$(\omega L \cos \varphi - r \sin \varphi) I = 0$$
$$(\omega L \sin \varphi + r \cos \varphi) I = E.$$

Ясно, что надлежащимъ подборомъ I и φ можно вполнѣ удовлетворить этому требованію, которое равносильно тому, чтобы удовлетворялось наше основное уравненіе. Соотвѣтствующія значенія I и φ вполнѣ опредѣляются послѣдними двумя уравненіями. Дѣйствительно, изъ перваго уравненія получаемъ:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}.$$

Отсюда:

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega L}{r}.$$

Возводя далѣе оба уравненія въ квадратъ и складывая ихъ, получаемъ:

$$I^2 (r^2 + \omega^2 L^2) = E^2,$$

откуда:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Такимъ образомъ, окончательно получаемъ для установившагося режима:

$$i = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left(\omega t - \operatorname{arc\,tg}\frac{\omega L}{r}\right).$$

Итакъ, амплитуда тока равняется частному отъ дѣленія амплитуды э.-д. силы на выраженіе:

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}.$$

Послѣднее играетъ роль того сопротивленія, которое данная цѣпь оказываетъ внѣшней перемѣнной э.-д. силѣ какъ вслѣдствіе существованія въ цѣпи обыкновеннаго омическаго сопротивленія, такъ и благодаря электромагнитной инерціи, противодѣйствующей всякимъ измѣненіямъ тока. Въ виду всего этого оно называется *полнымъ сопротивленіемъ* цѣпи перемѣннаго тока. Принято обозначать его буквою z, т. е. полагаемъ:

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}.$$

Здѣсь ωL есть слагающая полнаго сопротивленія, обусловливаемая электромагнитной инерціей цѣпи. Ясно, что:

$$\omega L = 2\pi N L.$$

Слѣдовательно, эта слагающая полнаго сопротивленія по величинѣ своей зависитъ отъ двухъ факторовъ: отъ частоты

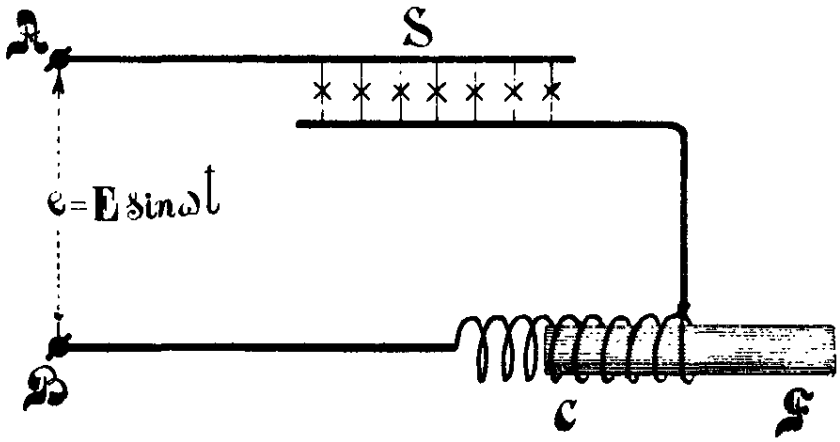


Рис. 120.

внѣшней э.-д. силы и отъ коэффиціента самоиндукціи цѣпи. Мѣняя оба эти фактора вмѣстѣ или порознь, мы можемъ въ самыхъ широкихъ предѣлахъ регулировать амплитуду силы тока при неизмѣнномъ омическомъ сопротивленіи r и при одной и той же величинѣ амплитуды э.-д. силы. На рисункѣ 120

представлена схема опыта, наглядно иллюстрирующаго все вышесказанное. Опытная цѣпь состоитъ изъ группы параллельно соединенныхъ ламиъ S, служащихъ весьма простымъ указателемъ того, насколько велика амплитуда силы тока, и катушки C, внутрь витковъ которой можетъ по желанію вдвигаться желѣзный сердечникъ F, составленный изъ отдѣльныхъ проволокъ во избѣжаніе токовъ Фуко. Допустимъ, что частота э.-д. силы сохраняется во время опыта неизмѣнною. Такъ обычно и бываетъ, если наши зажимы A и B присоединены, напримѣръ, къ городской сѣти перемѣннаго тока. Частота при этомъ бываетъ около 50 періодовъ въ секунду. Итакъ, имѣемъ:

$$N = \text{const}.$$

Пусть кромѣ того:

$$E = \text{const}.$$

Число витковъ катушки C можно подобрать такимъ образомъ, что при отсутствіи сердечника F, т. е. сравнительно небольшомъ значеніи коэффиціента самоиндукціи нашей цѣпи, лампы горятъ довольно ярко и совершенно гаснутъ, когда сердечникъ F вдвинутъ въ катушку, такъ какъ при этомъ значительно увеличивается ея коэффиціентъ самоиндукціи. При промежуточныхъ положеніяхъ сердечника получаются промежуточныя стадіи каленія ламиъ. Если имѣется въ распоряженіи альтернаторъ, скорость вращенія котораго можно измѣнять въ широкихъ предѣлахъ при условіи, чтобы у зажимовъ A и B сохранялось:

$$E = \text{const.},$$

въ такомъ случаѣ можно показать вліяніе частоты. Для этого можно, напримѣръ, вдвинуть сердечникъ F въ катушку настолько, чтобы при нѣкоторой частотѣ, скажемъ при:

$$N = 50,$$

лампы горѣли, накаливаясь лишь до-красна. Уменьшая частоту, мы увидимъ, что онѣ горятъ все ярче и ярче. Увеличивая же частоту, мы замѣтимъ обратное. Каленіе ламиъ будетъ все ослабляться и наконецъ онѣ совсѣмъ потухнутъ, когда частота превыситъ нѣкоторый предѣлъ.

Обратимся теперь къ другой величинѣ, характеризующей перемѣнный токъ въ данной цѣпи, именно къ разности фазъ

э.-д. силы и тока. Существованіе этой разности фазъ свидѣтельствуетъ намъ о томъ, что э.-д. сила и токъ неодновременно достигаютъ максимальнаго значенія, неодновременно проходятъ черезъ значеніе, равное нулю. Въ данномъ случаѣ измѣненія тока запаздываютъ относительно измѣненій э.-д. силы на время, составляющее очевидно такую долю времени полнаго періода T, какую φ составляетъ по отношенію къ 2π. Обозначая это время запаздыванія черезъ τ, можемъ, слѣдовательно, написать:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{\varphi}{2\pi},$$

откуда:

$$\tau = \frac{T}{2\pi}\varphi.$$

Причина этого запаздыванія, или, какъ говорятъ, *отставанія тока отъ э.-д. силы* состоитъ въ электромагнитной инерціи цѣпи. Величина отставанія прямо зависитъ отъ коэффиціента инерціи L. Изъ соотношенія:

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg}\frac{\omega L}{r}$$

видно, что при прочихъ равныхъ условіяхъ φ увеличивается съ увеличеніемъ L.

Въ случаѣ, когда самоиндукція цѣпи очень мала и можно допустить, что:

$$L = 0,$$

мы имѣемъ и:

$$\varphi = 0,$$

т. е. при этомъ токъ совпадаетъ по фазѣ съ э.-д. силой.

Въ другомъ предѣльномъ случаѣ, когда, наоборотъ, самоиндукція очень велика, изъ двухъ составляющихъ полнаго сопротивленія z составляющая:

$$\omega L$$

можетъ быть во много разъ больше омическаго сопротивленія r. Все происходитъ въ общемъ такъ, какъ будто бы въ этомъ случаѣ:

$$L = \infty$$

и соотвѣтственно:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Токъ при этомъ отстаетъ отъ э.-д. силы на четверть періода.

Практически въ цѣпи представленной схематически на рисункѣ 119, всегда имѣемъ:

$$0 < L < \infty$$

и соотвѣтственно:

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}.$$

На рисункѣ 121 представлены синусоиды э.-д. силы и тока для нѣкотораго промежуточнаго значенія φ. Такъ какъ вдоль

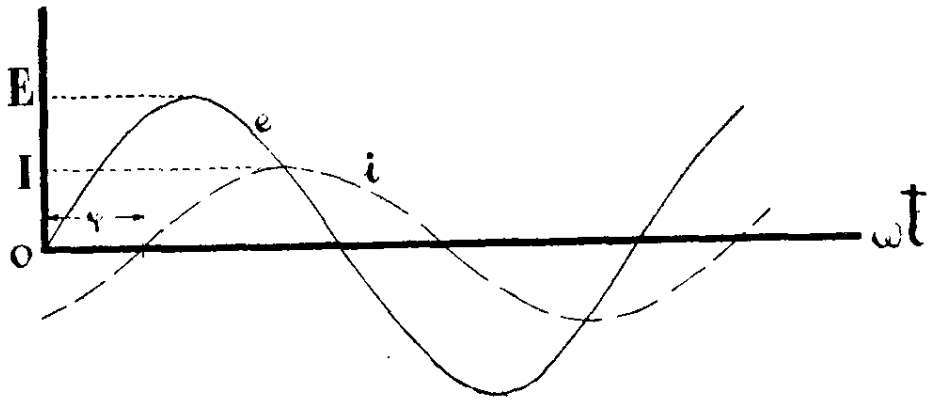


Рис. 121.

оси абсциссъ мы здѣсь откладываемъ фазу э.-д. силы ωt, то, слѣдовательно, разность фазъ φ графически изображается отрѣзкомъ оси абсциссъ, заключающимся между точками перехода черезъ эту ось кривыхъ э.-д. силы и тока въ одномъ и томъ же направленіи, т. е. отъ отрицательныхъ значеній къ положительнымъ или наоборотъ.

Иногда при изслѣдованіи явленій, происходящихъ въ цѣпи перемѣннаго тока, пользуются графическими методами, которые благодаря своей наглядности и простотѣ оказываются весьма цѣнными въ случаяхъ большой сложности. Подробное ознакомленіе съ этими методами выходитъ за предѣлы настоящаго курса. Мы здѣсь укажемъ только тѣ простѣйшія геометрическія соотношенія, которыя лежатъ въ основѣ графическихъ методовъ. Начнемъ съ сопротивленій цѣпи перемѣннаго тока. Изъ выраженія для полнаго сопротивленія:

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$$

получаемъ, какъ слѣдствіе, что полное сопротивленіе можно представить себѣ въ видѣ гипотенузы прямоугольнаго треугольника, катетами котораго оказываются двѣ слагающія полнаго сопротивленія. Этотъ *треугольникъ сопротивленій* представленъ

на рисункѣ 122. Уголъ между z и r есть уголъ φ. Умножая всѣ стороны этого треугольника на I, получаемъ *треугольникъ электродвижущихъ силъ* (рис. 123), который можно и непосредственно построить на основаніи соотношенія:

$$I = \frac{E}{z} =$$

$$= \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}}.$$

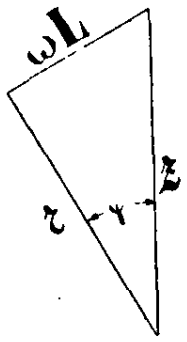


Рис. 122.

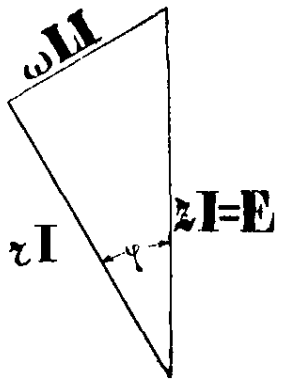


Рис. 123.

Изъ этого построенія слѣдуетъ, что внѣшняя э.-д. сила, дѣйствующая у зажимовъ цѣпи перемѣннаго тока, можетъ быть разсматриваема, какъ нѣкоторая геометрическая сумма двухъ слагаемыхъ, представляющихъ собою э.-д. силы, идущія на преодолѣніе омическаго сопротивленія r и индуктивнаго сопротивленія ωL.

75. Мощность перемѣннаго тока. Дѣйствующая сила тока. Дѣйствующая электродвижущая сила.—Мощность перемѣннаго тока въ каждый данный моментъ должна очевидно выражаться произведеніемъ мгновенныхъ значеній э.-д. силы у зажимовъ цѣпи и силы тока. Обозначая *мгновенное значеніе мощности* черезъ w, можемъ, слѣдовательно, написать:

$$w = ei.$$

Такъ какъ и e, и i непрерывно измѣняются, то и мощность въ цѣпи перемѣннаго тока не сохраняетъ постояннаго значенія, но въ свою очередь претерпѣваетъ непрерывныя измѣненія. Законъ, согласно которому измѣняется съ теченіемъ времени мгновенная мощность, можно установить, подставляя вмѣсто e и i ихъ значенія:

$$e = E \sin \omega t,$$
$$i = I \sin (\omega t - \varphi).$$

Такимъ образомъ:

$$w = ei =$$
$$= EI \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) =$$
$$= \frac{EI}{2} [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)] =$$
$$= \frac{EI}{2} \cos \varphi \left[1 - \frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{\cos \varphi} \right].$$

Послѣднее выраженіе показываетъ намъ, что мгновенная мощность перемѣннаго тока измѣняется по закону косинусовъ или, что то же, синусовъ съ теченіемъ времени. Другими словами, мгновенная мощность представляетъ собою гармоническую функцію времени, подобно э.-д. силѣ и силѣ тока. Однако въ случаѣ мощности частота будетъ удвоенная:

$$2N,$$

ибо подъ знакомъ косинуса стоитъ:

$$2\omega t = 2\pi \cdot 2N \cdot t.$$

Такъ какъ частота $2N$, вообще говоря, настолько велика, что мы въ нормальныхъ условіяхъ не можемъ слѣдить за всѣми измѣненіями мощности, и такъ какъ въ то же время эффектъ, производимый перемѣннымъ токомъ въ электрической цѣпи за нѣкоторый промежутокъ времени, зависитъ только отъ того, какова была мощность въ среднемъ за это время, то практически, характеризуя мощность перемѣннаго тока, говорятъ обычно именно о *средней мощности*. Величину этой средней мощности нетрудно найти, исходя изъ соотношенія:

$$w = \frac{EI}{2}\cos\varphi\left[1 - \frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{\cos\varphi}\right].$$

Коэффиціентъ, стоящій передъ большими скобками:

$$\frac{EI}{2}\cos\varphi$$

есть величина постоянная. Въ скобкахъ мы имѣемъ разность двухъ членовъ, изъ которыхъ величиною перемѣнною, измѣняющеюся съ теченіемъ времени, оказывается только второй:

$$\frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{\cos\varphi}.$$

Слѣдовательно, отнявъ отъ постоянной величины:

$$\frac{EI}{2}\cos\varphi$$

произведеніе этой же величины на среднее значеніе вышеуказанной перемѣнной, мы должны получить среднее значеніе мощности тока. Говоря вообще о среднемъ значеніи періоди-

чески измѣняющейся величины, обычно имѣютъ въ виду такой промежутокъ времени, въ теченіе котораго эта величина успѣваетъ одинаковое число разъ принять всѣ возможныя значенія. Очевидно, мы должны брать среднее значеніе за время одного полнаго періода или за цѣлое число періодовъ. Итакъ, рѣчь идетъ о розысканіи средняго за цѣлый періодъ значенія перемѣнной:

$$\cos\,(2\,\omega t - \varphi).$$

Такъ какъ за время полнаго періода фаза измѣняется на уголъ 2π, то ясно, что за это время косинусъ послѣдовательно приметъ всѣ возможныя значенія, какъ положительныя, такъ и отрицательныя. При этомъ положительныя значенія, принимаемыя въ теченіе одной половины періода, по абсолютной величинѣ равны отрицательнымъ значеніямъ второй половины періода. Слѣдовательно среднее значеніе косинуса за время полнаго періода равно нулю. И потому, обозначая среднюю мощность перемѣннаго тока черезъ W, можемъ написать:

$$W = \frac{EI}{2}\cos\varphi.$$

Обычно принято приводить это выраженіе къ нѣсколько иному виду. Именно преобразуютъ его слѣдующимъ образомъ:

$$W = \frac{EI}{2}\cos\varphi =$$
$$= \frac{E}{\sqrt{2}}\cdot\frac{I}{\sqrt{2}}\cos\varphi =$$
$$= E_0 \cdot I_0 \cos\varphi.$$

При этомъ принято называть величину:

$$E_0 = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

дѣйствующею электродвижущею силой, а величину:

$$I_0 = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

дѣйствующею силою тока. Смыслъ этихъ терминовъ можно уяснить себѣ, преобразовавъ немного выраженіе для средней мощности. Именно, на основаніи треугольника э.-д. силы (рис. 123) имѣемъ:

$$E\cos\varphi = rI.$$

Раздѣляя правую и лѣвую части на $\sqrt{2}$, получаемъ:

$$E_0 \cos\varphi = r I_0.$$

Производимъ теперь соотвѣтствующую замѣну въ выраженіи мощности:

$$W = I_0 E_0 \cos\varphi = r I_0^2.$$

Въ данномъ случаѣ вся мощность расходуется на нагрѣваніе проводника и эта мощность выражается черезъ сопротивленіе и дѣйствующую силу тока совершенно такъ же, какъ если бы мы имѣли дѣло съ постояннымъ токомъ. Если бы сила постояннаго тока была равна I_0, то очевидно онъ выдѣлилъ бы въ одну секунду въ сопротивленіи r то же количество тепла:

$$r I_0^2,$$

что и данный перемѣнный токъ.

Слѣдовательно, можемъ сказать, что *дѣйствующею силою перемѣннаго тока называется сила такого постояннаго тока, который можетъ выдѣлить въ данномъ проводникѣ столько же тепла и въ то же время, какъ и перемѣнный токъ.*

Изъ этого опредѣленія мы заключаемъ между прочимъ, что тепловые амперметры (см. § 67), проградуированные при постоянномъ токѣ, должны въ цѣпи перемѣннаго тока показывать непосредственно дѣйствующую силу его. И это должно быть справедливо совершенно независимо отъ частоты перемѣннаго тока.

Переходя далѣе къ выясненію понятія о дѣйствующей э.-д. силѣ, воспользуемся соотношеніемъ:

$$I = \frac{E}{z}.$$

Раздѣляя обѣ части на $\sqrt{2}$, получаемъ:

$$I_0 = \frac{E_0}{z}.$$

Подставляемъ это въ выраженіе для средней мощности:

$$W = E_0 I_0 \cos\varphi = \frac{E_0^2}{z} \cos\varphi = \frac{E_0^2}{r} \cdot \frac{r}{z} \cdot \cos\varphi.$$

Но изъ треугольника сопротивленій (рис. 122) вытекаетъ, что:

$$\frac{r}{z} = \cos\varphi.$$

Такимъ образомъ:

$$W = \frac{E_0^2}{r}\cos^2\varphi.$$

Представимъ себѣ теперь, что условія въ цѣпи перемѣннаго тока таковы, что:

$$\varphi = 0.$$

Въ такомъ случаѣ имѣемъ болѣе простое выраженіе для мощности:

$$W = \frac{E_0^2}{r}.$$

И въ данномъ случаѣ, слѣдовательно, мощность выражается черезъ сопротивленіе и дѣйствующую э.-д. силу совершенно такъ же, какъ если бы мы имѣли дѣло съ постоянной э.-д. силой E_0. Такъ какъ мощность эта расходуется на нагрѣваніе цѣпи, то можемъ дать опредѣленіе дѣйствующей э.-д. силы вполнѣ аналогичное опредѣленію дѣйствующей силы тока.

Именно, *дѣйствующею электродвижущею силою въ цѣпи перемѣннаго тока называется такая постоянная электродвижущая сила, подъ вліяніемъ которой въ данной цѣпи можетъ выдѣлиться столько же тепла и въ то же время, какъ и въ случаѣ перемѣнной электродвижущей силы, при условіи однако, что наша цѣпь удовлетворяетъ требованію:*

$$\varphi = 0.$$

Такимъ образомъ, если тепловой вольтметръ обладаетъ коэффиціентомъ самоиндукціи настолько малымъ, что можно практически положить:

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg}\frac{\omega L}{r} = 0,$$

то, предварительно проградуированный въ цѣпи постояннаго тока, онъ будетъ непосредственно показывать дѣйствующую э.-д. силу, будучи приключенъ къ цѣпи перемѣннаго тока. И это будетъ справедливо для всѣхъ частотъ, для которыхъ еще можно принять съ достаточною для практики точностью:

$$\frac{2\pi NL}{r} = 0.$$

Итакъ, средняя мощность, поглощаемая цѣпью перемѣннаго тока, выражается черезъ дѣйствующія значенія э.-д. силы и силы тока и черезъ разность фазъ э.-д. силы и тока:

$$W = E_0 I_0 \cos\varphi.$$

По сравненію съ тѣмъ, что мы имѣли бы въ случаѣ постояннаго тока, отличительною особенностью этого выраженія является коэффиціентъ:

$$\cos\varphi,$$

называемый иногда *коэффиціентомъ мощности*.

Такъ какъ:

$$0 < \cos\varphi < 1,$$

то, слѣдовательно, всегда имѣетъ мѣсто соотношеніе:

$$0 < W < E_0 I_0.$$

Такимъ образомъ, при однихъ и тѣхъ же дѣйствующихъ значеніяхъ э.-д. силы и силы тока средняя мощность перемѣннаго тока можетъ колебаться въ очень широкихъ предѣлахъ. Наименьшее значеніе средней мощности есть:

$$W = 0.$$

Это имѣетъ мѣсто при:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Наибольшее значеніе средней мощности:

$$W = E_0 I_0$$

получается въ случаѣ:

$$\varphi = 0.$$

При промежуточныхъ значеніяхъ разности фазъ получается промежуточное значеніе средней мощности.

Съ цѣлью выяснить до нѣкоторой степени эти особенныя свойства средней мощности перемѣннаго тока, обратимъ вниманіе на то обстоятельство, что величина разности фазъ, въ сущности говоря, характеризуетъ собою вліяніе электромагнитной инерціи цѣпи на ходъ явленій, въ ней совершающихся. Это ясно изъ соотношенія:

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega L}{r}.$$

Въ случаѣ, когда электромагнитная инерція цѣпи ничтожно мала, такъ что можно положить:

$$L = 0$$

и соотвѣтственно:

$$\varphi = 0,$$

средняя мощность выражается произведеніемъ дѣйствующихъ э.-д. силы и силы тока, т. е. совершенно такъ же, какъ если бы мы имѣли дѣло съ цѣпью постояннаго тока.

Но какъ только электромагнитная инерція цѣпи становится болѣе или менѣе замѣтной, условія, въ которыхъ токъ совершаетъ работу въ цѣпи, значительно усложняются. Дѣло въ томъ, что теперь, помимо расхода энергіи на нагрѣваніе проводниковъ цѣпи, въ теченіе нѣкоторыхъ долей періода, когда сила тока возрастаетъ, въ системѣ запасается электрокинетическая энергія (см. § 72). Отчасти за счетъ этого запаса энергіи токъ поддерживается въ цѣпи при обратномъ его измѣненіи, т. е. при ослабленіи, при чемъ, конечно, въ это время соотвѣтственно умепьшается расходъ энергіи со стороны генератора. И въ нѣкоторые моменты даже имѣетъ мѣсто обратное теченіе энергіи: отъ цѣпи къ генератору. Это бываетъ, когда мгновенныя значенія силы тока и э.-д. силы имѣютъ разные знаки (см. рис. 121) и когда, слѣдовательно:

$$w = ei < 0.$$

Итакъ, обмѣнъ энергіи между генераторомъ и внѣшнею цѣпью можно представить себѣ при перемѣнномъ токѣ въ слѣдующемъ видѣ. Генераторъ непрерывно расходуетъ мощность:

$$ri^2$$

на нагрѣваніе проводниковъ цѣпи. Параллельно съ этимъ неизмѣннымъ по направленію теченіемъ энергіи отъ генератора мы имѣемъ еще періодическое запасаніе энергіи въ системѣ въ количествѣ:

$$\frac{1}{2} LI^2$$

и слѣдующее затѣмъ возвращеніе этого запаса обратно генератору. Говоря о средней мощности, развиваемой генераторомъ въ нѣкоторой цѣпи перемѣннаго тока, мы можемъ, слѣдовательно, совсѣмъ не считаться съ существованіемъ измѣняющагося запаса

электрокинетической энергіи, а должны имѣть въ виду только мощность:

$$rI_0^2,$$

расходуемую на нагрѣваніе цѣпи.

Такъ какъ далѣе э.-д. силѣ, дѣйствующей въ цѣпи, приходится преодолѣвать не только омическое сопротивленіе r, но также и индуктивное сопротивленіе ωL, то ясно, что въ составъ этой э.-д. силы должны входить двѣ составляющія:

омическое паденіе напряженія rI_0
и индуктивное паденіе напряженія ωLI_0.

Именно, имѣетъ мѣсто слѣдующее, вытекающее изъ предыдущаго, соотношеніе:

$$E_0^2 = (rI_0)^2 + (\omega LI_0)^2.$$

Въ виду этого:

$$rI_0 < E_0$$

и вмѣстѣ съ тѣмъ:

$$W = rI_0^2 < E_0 I_0.$$

Для иллюстраціи всего вышеизложеннаго разсмотримъ кривыя мгновенныхъ мощностей въ различныхъ случаяхъ. На рисункѣ 124 построены кривыя э.-д. силы, тока и мощности при:

$$\varphi = 0.$$

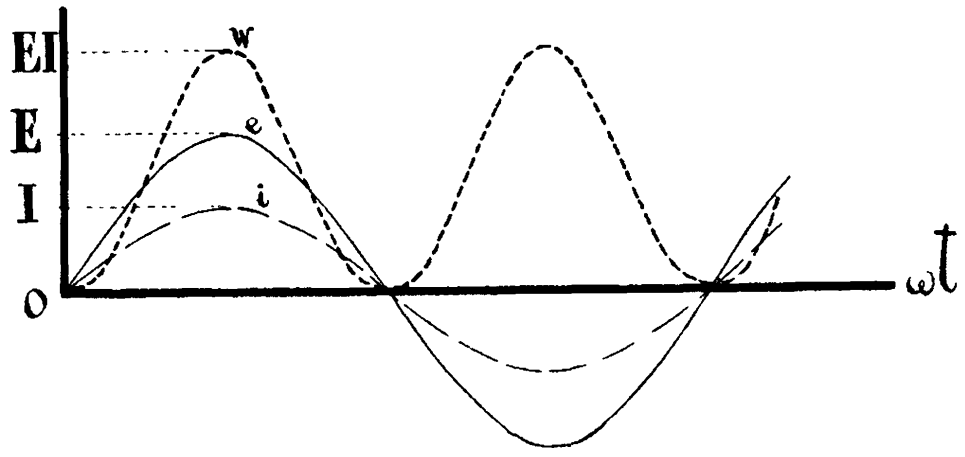


Рис. 124.

Ординаты отдѣльныхъ точекъ кривой мощности представляютъ собою произведенія соотвѣтствующихъ мгновенныхъ значеній э.-д. силы и тока. Мы видимъ, что въ этомъ случаѣ мощность всегда бываетъ положительной—кривая мощности лежитъ вся выше оси абсциссъ.

Въ случаѣ, если:

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2},$$

мы имѣемъ картину, представленную на рисункѣ 125. При этихъ условіяхъ мгновенная мощность въ теченіе нѣкоторой доли періода принимаетъ отрицательныя значенія. Въ это время

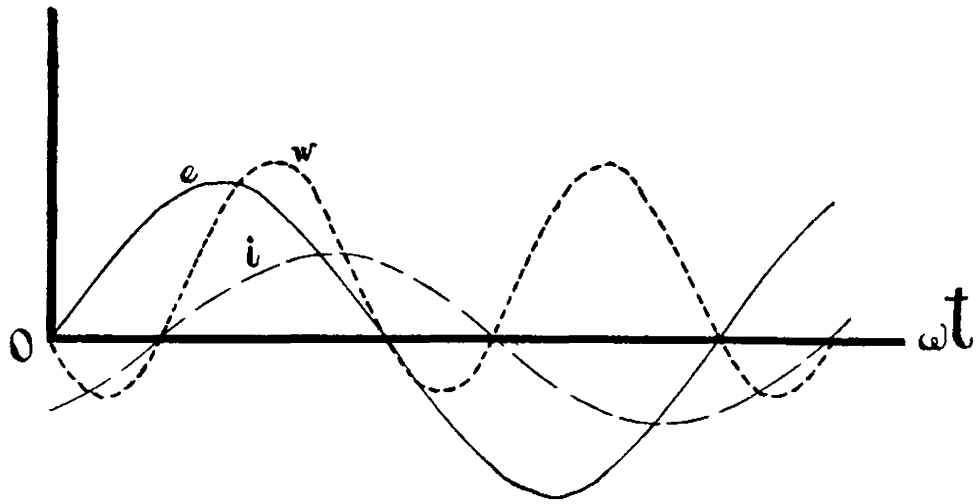


Рис. 125.

энергія течетъ изъ цѣпи въ генераторъ. Но все же въ теченіе большей части періода мощность положительна и потому средняя мощность больше нуля, хотя и меньше того, что было въ предыдущемъ случаѣ.

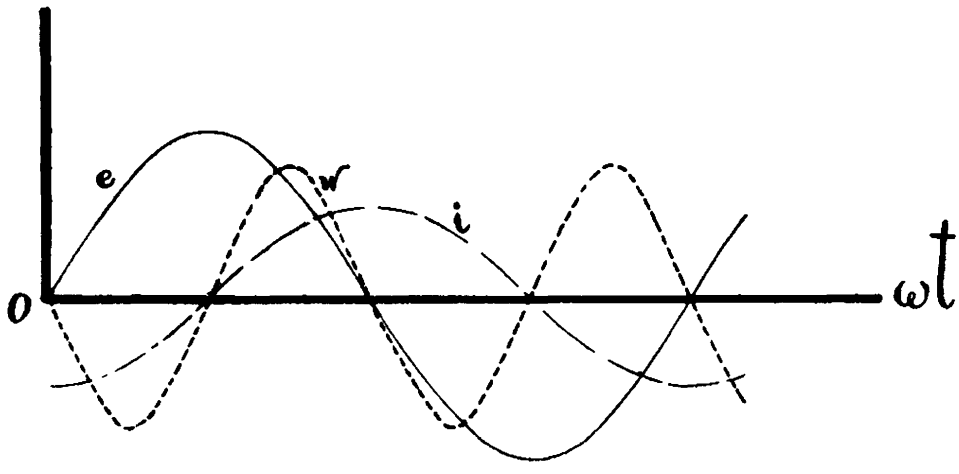


Рис. 126.

Наконецъ, на рисункѣ 126 представлена кривая мощности для случая:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Токъ при этомъ отстаетъ отъ э.-д. силы на четверть періода, кривая же мощности располагается совершенно симме-

трично по обѣ стороны оси абсциссъ. Мощность мѣняетъ свой знакъ въ теченіе каждой четверти періода э.-д. силы. Въ виду полной тождественности положительныхъ и отрицательныхъ частей кривой мощности ясно, что средняя мощность должна быть равна въ этомъ случаѣ нулю. Для осуществленія этого случая необходимо условіе:

$$r = 0.$$

Очевидно, это только теоретически мыслимо. Практически же мы можемъ лишь болѣе или менѣе близко подойти къ тому, чтобы можно было положить:

$$rI_\partial^2 = 0.$$

Мы въ этомъ случаѣ имѣемъ какъ бы непрерывное качаніе энергіи: нѣкоторое количество ея переходитъ отъ генератора въ цѣпь и здѣсь запасается въ видѣ энергіи магнитнаго потока, сцѣпляющагося съ контуромъ цѣпи, а затѣмъ этотъ запасъ энергіи цѣликомъ возвращается генератору и т. д. Перемѣнный токъ, отличающійся по фазѣ отъ э.-д. силы на:

$$\frac{\pi}{2}$$

и потому не обладающій въ среднемъ никакой мощностью, обыкновенно называютъ *безваттнымъ токомъ*.

Что касается измѣренія мощности перемѣннаго тока, то въ этомъ отношеніи можно съ успѣхомъ пользоваться ваттметромъ того устройства, которое описано въ § 57. Вслѣдствіе значительнаго момента инерціи подвижной части ваттметра эта послѣдняя не успѣваетъ принимать различныхъ положеній, соотвѣтствующихъ отдѣльнымъ мгновеннымъ мощностямъ, а принимаетъ нѣкоторое среднее положеніе, въ точности отвѣчающее средней мощности. Необходимо только, чтобы сопротивленіе подвижной катушки было достаточно велико и коэффиціентъ самоиндукціи ея достаточно малъ для того, чтобы отвѣтвленный черезъ эту катушку токъ былъ весьма близокъ по фазѣ къ э.-д. силѣ у зажимовъ изслѣдуемой цѣпи.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

Электрическое поле.

---

76. Основныя явленія. — Теперь мы остановимся на изученіи того состоянія, о которомъ уже упоминали при выводѣ понятія о потенціалѣ,—того состоянія, неравномѣрное распредѣленіе котораго въ проводникѣ обязательно сопровождается возникновеніемъ электрическаго тока. Это особое состояніе обнаруживается въ цѣломъ рядѣ характерныхъ явленій, на которыя мы до сихъ поръ не обращали вниманія, сосредоточивъ послѣднее почти исключительно на кинетической сторонѣ процесса, называемаго электрическимъ токомъ. Занимающее насъ теперь особое состояніе, присущее въ большей или меньшей степени всѣмъ точкамъ электрической цѣпи, обнаруживается не только при прохожденіи по цѣпи тока; оно можетъ быть обнаружено и тогда, когда цѣпь разомкнута и тока нѣтъ, если только однако въ цѣпи существуетъ э.-д. сила. Представимъ себѣ, напримѣръ, какой либо генераторъ *D* (рис. 127), къ зажимамъ котораго прикрѣплены два провода *A* и *B*. Если эти провода не соединены между собою—это именно и показано на рисункѣ—то въ цѣпи нѣтъ тока, не наблюдается и магнитнаго поля вокругъ проводниковъ. Можно все же обнаружить, что при этомъ проводники *A* и *B* способны въ большей или меньшей мѣрѣ (въ зависимости отъ величины э.-д. силы генератора и нѣкоторыхъ иныхъ условій) притягивать различные мелкіе предметы, какъ-то ло-

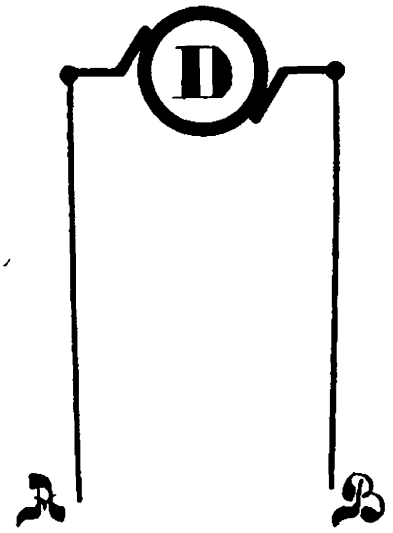


Рис. 127.

скутки тонкой бумаги, кусочки пробки и т. п. Эти характерныя явленія были первыми изъ области многочисленныхъ электрическихъ явленій, съ которыми познакомилось человѣчество. Еще въ древности было извѣстно свойство янтаря притягивать легкіе предметы, пріобрѣтаемое имъ послѣ натиранія о другія тѣла. По имени янтаря—по гречески *электронъ*—и названы всѣ эти явленія *электрическими*. Тѣло, пріобрѣвшее описываемыя особенныя свойства, называютъ *наэлектризованнымъ*. То нѣчто, присутствіе котораго на поверхности тѣла мы считаемъ причиной его электризаціи, называютъ *электричествомъ*. Пространство, окружающее наэлектризованныя тѣла и оказывающееся мѣстомъ проявленія электрическихъ силъ, называютъ *электрическимъ полемъ*. Область электрическихъ явленій, наблюдаемыхъ и при полномъ отсутствіи какого либо кинетическаго процесса—наблюдаемыхъ, слѣдовательно, и при статическихъ условіяхъ, называется обычно областью *электростатики*.

Существуетъ много способовъ, помощью которыхъ можно тѣла наэлектризовать. Способъ тренія, о которомъ мы упоминали выше, говоря объ электризаціи янтаря, представляетъ собою старѣйшій способъ. И до настоящаго времени онъ часто примѣняется; между прочимъ, въ силу установившихся традицій, имъ обыкновенно пользуются въ тѣхъ основныхъ опытахъ, съ которыхъ начинаютъ изученіе электростатики. Можно утверждать, что всякія два разнородныя тѣла при треніи другъ о друга электризуются. Классическій примѣръ этого представляетъ электризованіе смоляной палочки при треніи о шерстяную ткань или мѣхъ и электризованіе стеклянной палочки при треніи объ амальгамированную кожу.

То дѣленіе всѣхъ тѣлъ природы на *проводники* и непроводники или *изоляторы*, съ которымъ мы познакомились въ § 18, необходимо имѣть въ виду при всякаго рода опытахъ съ электризованіемъ тѣлъ. Дѣло въ томъ, что электризуя, напримѣръ, треніемъ металлическое проводящее тѣло, мы замѣчаемъ слѣдующее. Электрическое состояніе, сообщенное любой части проводника, немедленно распространяется по всей его поверхности и переходитъ далѣе на поверхность всѣхъ другихъ проводящихъ тѣлъ, съ которыми мы приведемъ въ соприкосновеніе данное тѣло. При этомъ интенсивность проявленій электризаціи—притяженія легкихъ тѣлъ и т. д.—непрерывно уменьшается по мѣрѣ того, какъ увеличивается число и поверхность тѣхъ тѣлъ,

съ которыми будетъ дѣлить свой первоначальный *электрическій зарядъ* данное проводящее тѣло. Такимъ образомъ, если мы черезъ посредство проводниковъ приведемъ данное заряженное металлическое тѣло въ соединеніе съ землей, то его зарядъ перейдетъ и на землю, на весь земной шаръ, который мы въ общемъ должны разсматривать, какъ проводникъ. Ясно, что при подобномъ перераспредѣленіи заряда значительнѣйшая часть его перейдетъ на землю. Въ виду того, что геометрическіе размѣры земли чрезвычайно велики по сравненію съ размѣрами даннаго тѣла, практически всякое заряженное тѣло *разряжается*, т. е. теряетъ свой электрическій зарядъ при сообщеніи съ землей, если только, конечно, онъ не возобновляется непрерывно, благодаря тѣмъ или инымъ условіямъ. Для того, чтобы сохранить данное тѣло заряженнымъ и чтобы зарядъ его не мѣнялся, необходимо уединить его отъ земли и отъ другихъ проводящихъ тѣлъ при помощи тѣлъ непроводящихъ — изоляторовъ, къ числу которыхъ относятся, напримѣръ, смолы, стекло, фарфоръ, слюда, парафинъ, сѣра, шелкъ, воздухъ и т. д. Если же мы будемъ электризовать, допустимъ, смоляную палочку, натирая часть ея поверхности мѣхомъ, то электрическое состояніе сообщится только этой части поверхности и отнюдь не распространится по всей смоляной палочкѣ.

Опытъ показываетъ, что электризація можетъ быть двухъ родовъ. Въ этомъ можно убѣдиться слѣдующимъ образомъ. Возьмемъ два бузинныхъ шарика A и B, покрытыхъ сусальнымъ золотомъ и подвѣшенныхъ на шелковыхъ нитяхъ, и поднесемъ ихъ къ смоляной палочкѣ, потертой мѣхомъ. Шарики будутъ притягиваться къ смолѣ, но если мы позволимъ имъ коснуться ея заряженной поверхности, то они начнутъ отталкиваться и отъ смолы и другъ отъ друга. Возьмемъ теперь другую пару такихъ же шариковъ C и D и приведемъ ихъ въ соприкосновеніе со стеклянной палочкой, потертой объ амальгамированную кожу. Мы опять увидимъ, что эти шарики будутъ отталкиваться отъ стеклянной палочки и другъ отъ друга. Но если мы сблизимъ шарикъ A и C или B и D, то окажется, что они притягиваются. Мы должны такимъ образомъ заключить, что электризація шарика C иного рода по сравненію съ электризаціей шарика B: шарики A и B отталкиваются, а шарики A и C притягиваются. Точно также мы заключаемъ, что электризація будетъ разнаго рода и у шариковъ A и D. Въ то же время

изъ условій опыта совершенно очевидно, что шарики A и B наэлектризованы одинаково. То же надо утверждать и относительно шариковъ C и D. Такимъ образомъ *тѣла, одинаково наэлектризованныя, взаимно отталкиваются, а тѣла, наэлектризованныя разнородно, взаимно притягиваются.* Совершенно условно электризацію стеклянной палочки называютъ *положительной*, а электризацію смоляной — *отрицательной*. Условность заключается въ томъ, что по существу мы не имѣемъ рѣшительно никакихъ категорическихъ указаній, какую именно электризацію слѣдуетъ назвать положительною. Въ то же время однако несомнѣнно, что, приписывая двумъ возможнымъ электризаціямъ знаки $+$ и $-$, мы поступаемъ въ полномъ согласіи съ указаніями опыта: два рода электризаціи или, какъ будемъ говорить въ дальнѣйшемъ, два рода электричества обладаютъ свойствами, которыя могутъ быть противополагаемы въ томъ же смыслѣ, какъ и свойства алгебраическихъ положительныхъ и отрицательныхъ количествъ. Дѣйствительно, приводя въ соприкосновеніе два тѣла, заряженныхъ одно положительно, другое отрицательно, мы въ результатѣ получимъ, вообще говоря, ослабленіе электрическаго состоянія на каждомъ изъ тѣлъ. Въ частномъ случаѣ при соотвѣтствующемъ подборѣ первоначальныхъ зарядовъ, мы можемъ получить даже полную нейтрализацію положительнаго и отрицательнаго электричествъ: оба тѣла придутъ послѣ соприкосновенія въ совершенно нейтральное состояніе. Въ виду этого всякое незаряженное тѣло мы можемъ разсматривать, какъ тѣло, содержащее въ себѣ сколь угодно большіе заряды противоположныхъ знаковъ, равные по абсолютной величинѣ. Практически, «сообщить тѣлу положительный зарядъ» это значитъ то же, что и «отнять отъ тѣла отрицательное электричество».

Къ заключенію о томъ, что существуетъ два рода электричества, насъ можетъ привести и внимательное разсмотрѣніе условій, въ которыхъ находится разомкнутая цѣпь, представленная на рис. 127. Именно, мы знаемъ, во-первыхъ, что проводники A и B заряжены: это можемъ обнаружить хотя бы по притяженію легкихъ предметовъ каждымъ изъ этихъ проводниковъ въ отдѣльности. Мы знаемъ, во-вторыхъ, что достаточно только привести въ соприкосновеніе концы проводовъ A и B для того, чтобы въ цѣпи возникъ электрическій токъ. Если бы проводники A и B вообще и ихъ концы въ частности были

одинаковы въ отношеніи ихъ электрическаго состоянія, то, очевидно, соприкосновеніе ихъ ничего не измѣняло бы въ системѣ и токъ не могъ бы возникнуть. Ясно, что до соприкосновенія концовъ проводовъ A и B они находились въ различныхъ электрическихъ состояніяхъ и электричества, которыми они были заряжены, разнородны. Можно нѣсколько дополнить и видоизмѣнить нашу разомкнутую цѣпь, что позволитъ намъ произвести опытъ, аналогичный опыту съ четырьмя бузинными шариками, заряженными отъ смоляной и стеклянной палочекъ. Представимъ себѣ, что проводники A и B, присоединенные къ зажимамъ генератора D, въ достаточной мѣрѣ гибки и пусть къ концамъ этихъ проводниковъ (рис. 128) присоединено по парѣ легкихъ проводящихъ шариковъ, висящихъ на проводящихъ же нитяхъ. Пока въ генераторѣ не развивается э.-д. силы, шарики будутъ свѣшиваться внизъ и никакихъ особыхъ явленій наблюдаться не будетъ. Но какъ только возникнетъ въ генераторѣ э.-д. сила, то произойдетъ слѣдующее явленіе, легко наблюдаемое непосредственно при достаточной величинѣ э.-д. силы. Шарики, присоединенные къ одному и тому же проводнику, начнутъ взаимно отталкиваться и въ то же время гибкіе свѣшивающіеся внизъ проводники A и B начнутъ взаимно притягиваться.

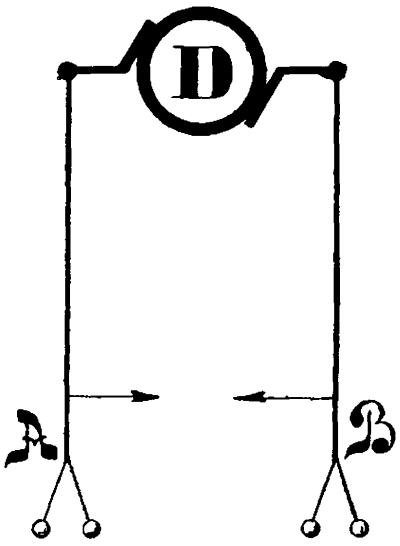


Рис. 128.

Въ разсматриваемомъ случаѣ проводники A и B заряжаются противоположными электричествами и это разнородное ихъ состояніе можетъ поддерживаться неопредѣленно долго, пока существуетъ э.-д. сила въ генераторѣ D. Истинная природа того, что происходитъ въ каждомъ генераторѣ и какъ возникаетъ э.-д. сила, намъ неизвѣстна. Мы должны смотрѣть на э.-д. силу, какъ на причину, которая раздѣляетъ противоположныя электричества, имѣющіяся въ неограниченномъ количествѣ въ каждомъ нейтральномъ тѣлѣ, и гонитъ, двигаетъ ихъ въ разныя стороны. То направленіе, которое мы раньше условно приняли за положительное направленіе тока и э.-д. силы (§ 22), есть какъ разъ направленіе движенія положительнаго электричества.

Когда мы раньше (§ 38) говорили о теченіи электричества по проводнику, какъ объ одной изъ сторонъ того сложнаго про-

цесса, который называется электрическимъ токомъ, мы разсуждали такъ, какъ будто бы течетъ только положительное электричество. Весьма вѣроятно, что въ дѣйствительности дѣло происходитъ нѣсколько сложнѣе. Возможно, что течетъ и положительное электричество въ направленіи тока, и отрицательное въ направленіи противоположномъ. Но такъ какъ, въ силу противоположности свойствъ двухъ родовъ электричества, движеніе нѣкотораго количества положительнаго электричества въ нѣкоторую сторону эквивалентно движенію такого же количества отрицательнаго электричества въ противоположную сторону, то мы можемъ условно всегда разсуждать такъ, какъ будто бы въ процессѣ тока течетъ только положительное электричество. При этомъ мы должны условно считать, что черезъ поперечное сѣченіе цѣпи протекаетъ положительное электричество въ количествѣ, равномъ суммѣ абсолютныхъ значеній количествъ электричества положительнаго и отрицательнаго, въ дѣйствительности протекающихъ по противоположнымъ направленіямъ.

77. Электроскопъ. — Для обнаруженія электрическаго состоянія тѣлъ обычно пользуются механическими взаимодѣйствіями наэлектризованныхъ тѣлъ. Соотвѣтствующіе приборы, основанные на подобныхъ механическихъ взаимодѣйствіяхъ, называются *электроскопами*. Въ общемъ устройство электроскоповъ обычно ничѣмъ по существу не отличается отъ того приспособленія, которое было изображено на рисункѣ 128 и которое состояло изъ двухъ легкихъ проводящихъ шариковъ, подвѣшенныхъ на проводящихъ же нитяхъ. Въ данномъ случаѣ этотъ примитивный электроскопъ былъ непосредственно связанъ съ тѣмъ тѣломъ, электризацію котораго желательно было констатировать. Обыкновенно подвижныя части электроскопа (шарики на нитяхъ, бумажные или металлическіе листочки и т. п.) прикрѣпляются къ особому металлическому стержню и располагаются внутри стекляннаго или металлическаго сосуда съ цѣлью предохраненія ихъ отъ движеній воздуха или отъ внѣшнихъ вліяній электрическаго характера. На рис. 129 представленъ подобный электроскопъ съ двумя золотыми листочками. Сообщая стержень электроскопа съ изслѣдуемымъ заряженнымъ тѣломъ непосредственно или при помощи проволокъ, мы тѣмъ самымъ, очевидно, сообщимъ нѣ-

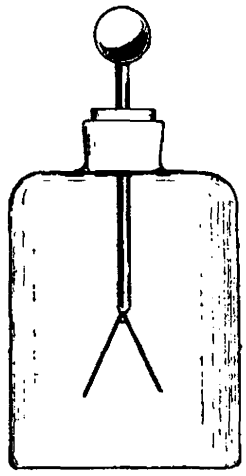


Рис. 129.

который зарядъ и самому стержню, и прикрѣпленнымъ къ нему золотымъ листочкамъ. Послѣдніе при этомъ разойдутся, взаимно расталкиваясь, какъ тѣла одноименно наэлектризованныя.

Иногда электроскопъ снабжаютъ спеціальными приспособленіями, позволяющими болѣе или менѣе точно измѣрять расхожденіе листочковъ или вообще перемѣщеніе подвижной части прибора. Такой приборъ называютъ *электрометромъ*, ибо онъ позволяетъ опредѣлять степень электризаціи приводимыхъ въ соприкосновеніе съ нимъ тѣлъ.

78. Законъ Кулона. — Механическія взаимодѣйствія наэлектризованныхъ тѣлъ могутъ быть формально объясняемы и долгое время объяснялись особыми свойствами тѣхъ электрическихъ массъ — электричествъ, которыя мы представляемъ себѣ расположенными на поверхностяхъ взаимодѣйствующихъ тѣлъ. Кулонъ опытнымъ путемъ обслѣдовалъ эти взаимодѣйствія съ количественной стороны и полученные результаты привелъ къ виду вполнѣ аналогичному формулировкѣ соотвѣтствующаго закона для магнитнаго поля. Такимъ образомъ мы имѣемъ *законъ Кулона для электрическаго поля*:

$$f = \frac{1}{k}\frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}.$$

Здѣсь q_1 и q_2 — взаимодѣйствующія количества электричества, d — разстояніе между ними, а $\frac{1}{k}$ — коэффиціентъ пропорціональности, который мы пишемъ въ такомъ именно видѣ, такъ какъ знаменатель k имѣетъ, какъ увидимъ ниже, вполнѣ опредѣленный физическій смыслъ. Сила взаимодѣйствія f зависитъ отъ свойствъ промежуточной среды и это обстоятельство и приводитъ насъ къ величинѣ k, характеризующей между прочимъ промежуточную среду въ отношеніи ея участія въ электрическихъ явленіяхъ.

79. Электростатическая единица количества электричества. — Коэффиціентъ k въ формулѣ Кулона зависитъ отъ свойствъ промежуточной изолирующей среды и отъ выбора единицъ. Обычно принимаютъ для пустоты (почти то же имѣемъ и для воздуха):

$$k = 1.$$

Въ такомъ случаѣ формула Кулона принимаетъ видъ:

$$f = \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}.$$

Теперь мы уже связаны въ выборѣ единицъ. Если f будемъ выражать въ динахъ, а d — въ сантиметрахъ, то количество электричества мы обязаны выражать въ единицахъ, вытекающихъ изъ закона Кулона. Именно, если положимъ:

$$q_1 = q_2 = q,$$

то имѣемъ:

$$f = \frac{q^2}{d^2},$$

откуда:

$$q = \pm d\sqrt{f}.$$

Полагая:

$$f = 1 \text{ динѣ},$$
$$d = 1 \text{ см.},$$

получаемъ:

$$q = \pm 1.$$

Эта единица количества электричества называется *абсолютной электростатической*. Итакъ, *абсолютная электростатическая единица количества электричества есть такое количество его, которое взаимодѣйствуетъ въ пустотѣ съ силой, равной одной динѣ, съ другимъ такимъ же количествомъ электричества, находящимся на разстояніи одного сантиметра.*

Опытныя изслѣдованія показываютъ, что между этой единицей и электромагнитной единицей количества электричества существуетъ такое соотношеніе:

$$1 \text{ абс. эл.-магн. ед.} = 3 \cdot 10^{10} \text{ абс. эл.-стат. ед.}$$

Такъ какъ кулонъ есть 0,1 абсолютной электромагнитной единицы количества электричества, то слѣдовательно:

$$1 \text{ кулонъ} = 3 \cdot 10^{9} \text{ абс. эл.-стат. ед.}$$

80. Электрическая сила поля. — *Силою электрическаго поля или просто электрическою силою въ данной точкѣ называется та сила, которая дѣйствовала бы на маленькое тѣло, заряженное единицей положительнаго электричества и помѣщенное въ разсматриваемую точку.*

При этомъ предполагается, что помѣщеніе такого тѣла въ разсматриваемую точку не измѣняетъ распредѣленія зарядовъ въ системѣ наэлектризованныхъ тѣлъ, съ которыми связано данное поле.

Такимъ образомъ мы можемъ охарактеризовать электрическое поле электрической силой, которая въ каждой точкѣ поля вполнѣ опредѣленна по величинѣ и направленію.

Электрическую силу мы будемъ обозначать буквою F.

Ясно конечно, что механическая сила f, дѣйствующая на зарядъ q, помѣщенный въ полѣ, сила котораго есть F, будетъ:

$$f = q \cdot F \text{ динъ.}$$

81. Потенціалъ.—Понятіе объ электрическомъ потенціалѣ, съ которымъ мы познакомились въ ученіи объ электрическомъ токѣ, играетъ весьма важную роль въ теоріи электрическаго поля. То опредѣленіе потенціала и разности потенціаловъ, которое было дано въ §§ 52 и 53, въ полной мѣрѣ примѣнимо и въ данномъ случаѣ. Надо только помнить, что та внѣшняя причина, которая движетъ единицу положительнаго электричества, есть именно электрическая сила поля. Такимъ образомъ, мы приходимъ къ слѣдующему опредѣленію:

Потенціалъ любой точки электрическаго поля равенъ работѣ, совершаемой силами поля при передвиженіи единицы положительнаго электричества отъ данной точки до другой, потенціалъ которой условно принятъ равнымъ нулю.

На практикѣ весьма часто потенціалъ земли принимаютъ равнымъ нулю и, такимъ образомъ, потенціалы всѣхъ точекъ электрическаго поля мы можемъ выражать по отношенію къ землѣ.

Разность потенціаловъ между любыми двумя точками A и B электрическаго поля представляетъ собою работу, совершаемую силами поля при передвиженіи единицы положительнаго электричества отъ точки A до точки B.

Всякая точка электрическаго поля обладаетъ нѣкоторымъ потенціаломъ независимо отъ того, будетъ ли это точка въ объемѣ изолятора (по Фарадэю, *діэлектрика*), раздѣляющаго наэлектризованныя тѣла, или это будетъ какая либо точка на поверхности или внутри проводящаго тѣла, находящагося въ электрическомъ полѣ.

Въ этомъ смыслѣ опредѣленія потенціала и разности потенціаловъ, данныя въ настоящемъ §, общнѣе опредѣленій, съ которыми мы познакомились раньше, изучая законы электрическаго тока.

Разность потенціаловъ между точками A и B не зависитъ отъ пути, по которому единица электричества переносится, такъ

какъ какова бы ни была форма пути, совершаемая электрическими силами работа будетъ одна и та же. Это можно показать, основываясь на законѣ сохраненія энергіи. Дѣйствительно, если бы работа, совершаемая электрическими силами поля при перенесеніи единицы положительнаго электричества изъ точки A въ точку B, зависѣла отъ выбора пути, то можно было бы вообразить себѣ такой круговой процессъ непрерывнаго движенія электрическаго заряда въ полѣ, который сопровождался бы возникновеніемъ энергіи изъ ничего. Именно, пусть имѣется два пути, I и II, ведущихъ отъ точки A къ точкѣ B (рис. 130) и пусть при этомъ работа вдоль пути I будетъ больше работы вдоль пути II. Пусть теперь единица положительнаго электричества непрерывно переходитъ отъ A къ B по пути I и отъ B къ A обратно по пути II. При обратномъ переходѣ отъ B къ A должна быть затрачена работа какимъ либо внѣшнимъ дѣятелемъ, который долженъ преодолѣвать силы поля. Но согласно условію эта работа будетъ меньше работы, соотвѣтствующей пути I. Такимъ образомъ, хотя единица электричества снова находится въ точкѣ A, изъ которой она вышла, и хотя — если поле создано исключительно электрическими зарядами — все находится въ томъ самомъ состояніи, съ котораго мы начали, мы всетаки будемъ имѣть выигрышъ работы. Но этотъ результатъ противорѣчитъ закону сохраненія энергіи. Слѣдовательно, исходныя наши предположенія неправильны, что и требовалось доказать.

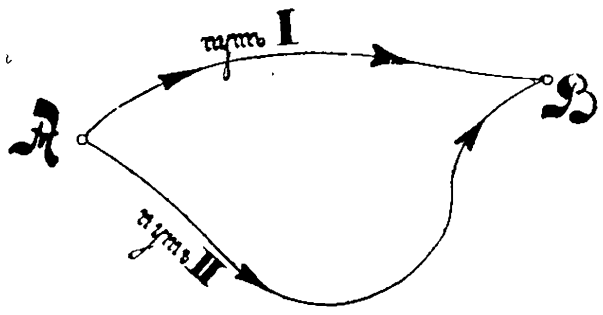


Рис. 130.

Если точки A и B настолько близки одна къ другой, что электрическую силу на промежуткѣ AB можно считать постоянною, то въ этомъ случаѣ можно написать:

$$V_A - V_B = F \cdot l,$$

гдѣ F есть составляющая электрической силы по направленію AB, а l есть длина этого промежутка. Отсюда имѣемъ:

$$F = \frac{V_A - V_B}{l},$$

т. е. *составляющая электрической силы по какому либо направленію численно равна убыли потенціала по этому направленію, разсчитанной на единицу длины.*

Всѣ точки проводника, помѣщеннаго въ электрическомъ полѣ, находящемся въ равновѣсіи, должны имѣть одинъ и тотъ же потенціалъ, т. е. для всѣхъ точекъ этого проводника мы можемъ написать:

$$V = \text{const.}$$

Такъ должно быть, ибо въ противномъ случаѣ, въ силу разности потенціаловъ между отдѣльными частями проводника, въ немъ возникнетъ токъ, который будетъ имѣть слѣдствіемъ уравниваніе потенціаловъ отдѣльныхъ частей проводника, и въ концѣ концовъ система придетъ въ равновѣсіе, когда въ данномъ проводникѣ исчезнутъ всѣ разности потенціаловъ.

На основаніи предыдущаго ясно, что во всѣхъ точкахъ внутри проводника, помѣщеннаго въ электрическомъ полѣ, находящемся въ равновѣсіи, мы будемъ обязательно имѣть:

$$F = 0.$$

Приведенныя въ §§ 51 и 79 соотношенія показываютъ, что абсолютная электростатическая единица разности потенціаловъ равна 300 вольтамъ.

82. Электрическое поле съ фарадэевской точки зрѣнія. — До сихъ поръ мы не дѣлали никакихъ предположеній относительно того, чѣмъ обусловливаются различныя свойства электрическаго поля, вообще, и механическія силы въ немъ возникающія, въ частности. Механическія проявленія электрическаго поля съ формальной стороны совершенно точно описываются закономъ Кулона. Изъ этого однако отнюдь не слѣдуетъ, что электрическіе заряды способны взаимодѣйствовать на разстояніи. Намъ только такъ кажется. Въ дѣйствительности же необходимо признать правильной точку зрѣнія Фарадэя, который ввелъ въ науку представленіе объ участіи промежуточной среды въ электрическихъ явленіяхъ. По Фарадэю, эти явленія представляютъ собою результатъ особаго состоянія среды между заряженными тѣлами, а не результатъ непосредственнаго дѣйствія на разстояніи одного наэлектризованнаго тѣла на другое.

Фарадэевскій методъ разсмотрѣнія электрическаго поля тѣсно связанъ съ тою картиной, которая получается при построеніи

системы электрическихъ силовыхъ линій поля. Съ этими картинами мы прежде всего и познакомимся въ общихъ чертахъ.

Силовою линіею электрическаго поля называется такая кривая, каждый элементъ которой совпадаетъ по направленію съ силою поля въ той точкѣ, гдѣ находится разсматриваемый элементъ.

Силовую линію можно также опредѣлить, какъ траэкторію, описываемую маленькимъ заряженнымъ тѣломъ, лишеннымъ инерціи.

За положительное направленіе электрическихъ силовыхъ линій принято считать то направленіе, по которому будетъ двигаться положительно заряженное тѣло. Слѣдовательно, силовыя линіи идутъ отъ положительно заряженныхъ тѣлъ къ тѣламъ, заряженнымъ отрицательно.

На рисункѣ 131 изображены силовыя линіи въ полѣ, окружающемъ два наэлектризованныхъ тѣла, заряды которыхъ равны и противоположны.

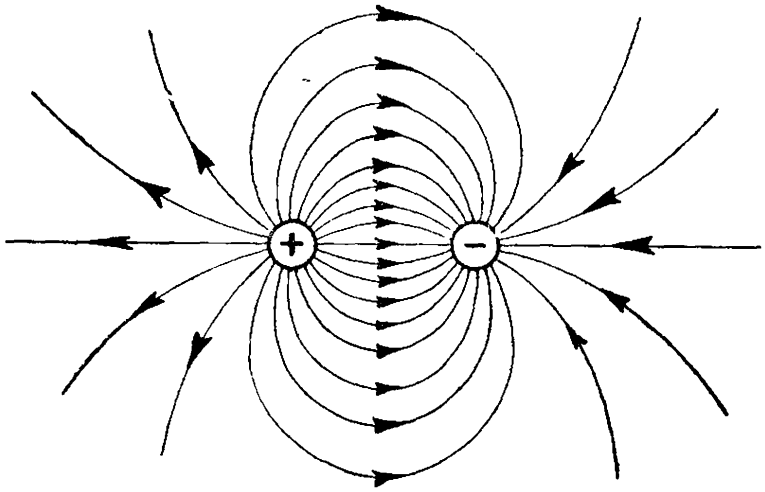


Рис. 131.

На рисункѣ 132 представлена система силовыхъ линій въ полѣ двухъ одинаково наэлектризованныхъ тѣлъ. Въ этомъ случаѣ силовыя линіи не идутъ отъ одного наэлектризованнаго тѣла къ другому, но направляются въ безконечность отъ каждаго изъ тѣлъ самостоятельнымъ пучкомъ. На рисункѣ 133 изображены силовыя линіи между двумя параллельными проводящими пластинками конечной величины. Верхняя заряжена положительно, нижняя отрицательно. Между центральными частями пластинокъ силовыя линіи суть прямыя, перпендикулярныя къ пластинкамъ; ближе къ краямъ онѣ искривлены наружу, на краяхъ онѣ выходятъ наружу и затѣмъ нѣкоторыя

идутъ съ наружной стороны одной пластинки на наружную сторону другой.

Взглядъ Фарадэя на силовыя линіи электрическаго поля во многомъ аналогиченъ его же взгляду на магнитныя силовыя ли-

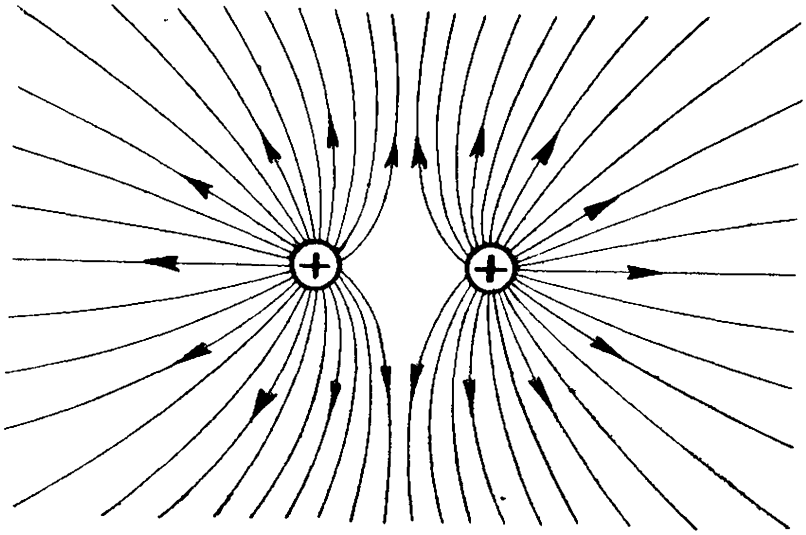


Рис. 132.

нiи. По Фарадэю, электрическія силовыя линіи характеризуютъ собою ту деформацію среды, которая имѣетъ мѣсто въ электрическомъ полѣ и которая именно и обусловливаетъ всѣ наблюдаемыя въ полѣ явленія. Дѣйствительно, всѣ рѣшительно дан-

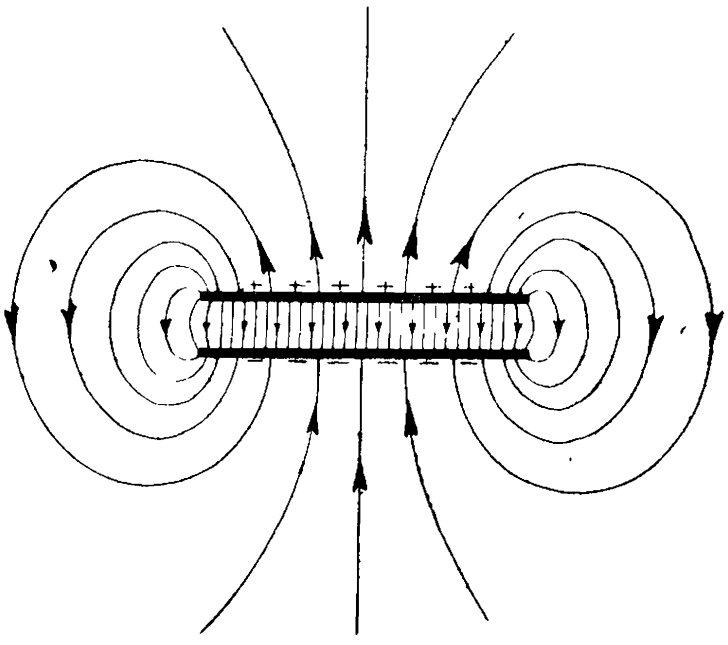


Рис. 133.

нiя опыта свидѣтельствуютъ о томъ, что особыя свойства среды въ электрическомъ полѣ извѣстнымъ образомъ оріентируются вокругъ тѣхъ направленій, которыя опредѣляются въ каждой точкѣ поля проходящей черезъ нее силовой линіей. Иными сло-

вами, направленіе силовой линіи въ каждой точкѣ поля есть какъ разъ направленіе той деформаціи электрическаго характера, которая произведена въ средѣ.

Въ чемъ заключается электрическая деформація, — мы не знаемъ. Максвелль, развившій идеи Фарадэя, высказалъ гипотезу относительно природы этой деформаціи, которую онъ назвалъ *электрическимъ смѣщеніемъ*. По Максвеллю, электрическое смѣщеніе можно разсматривать, какъ дѣйствительный сдвигъ электричества въ направленіи силовыхъ линій, сдвигъ, который возникаетъ въ то время, когда образуется электрическое поле. И этотъ сдвигъ электричества—электрическое смѣщеніе—имѣетъ мѣсто во всемъ объемѣ діэлектрика (изолятора), гдѣ только обнаруживаются электрическія силы. Съ точки зрѣнія формальной представить это вполнѣ возможно, ибо мыслимы два равномѣрныхъ распредѣленія положительнаго и отрицательнаго электричества по всему объему діэлектрика. На каждый элементъ объема приходится по равному количеству положительнаго и отрицательнаго электричества, и потому мы не замѣчаемъ электризаціи среды. И положительное, и отрицательное электричество, распредѣленное въ діэлектрикѣ, нормально удерживается въ извѣстномъ положеніи силами, аналогичными силамъ упругости. Когда создается поле и возникаетъ электрическое смѣщеніе, діэлектрикъ, какъ говорятъ, *поляризуется*. Мы имѣемъ въ этомъ случаѣ *электрическую упругую деформацію*. Какъ только исчезнутъ причины, создающія электрическое поле, тотчасъ *силы электрической упругости* возвращаютъ смѣщенныя электричества на мѣсто и поляризація исчезаетъ, т. е. вещество діэлектрика приходитъ въ нормальное состояніе.

Эта гипотеза Максвелля оказалась плодотворной въ томъ отношеніи, что благодаря ей возникло представленіе о токахъ въ діэлектрикѣ, въ изоляторѣ. Такіе токи несомнѣнно могутъ имѣть мѣсто. Въ отличіе отъ обычныхъ *проводниковыхъ токовъ* эти *токи смѣщенія* не могутъ сколь угодно долго сохранять неизмѣнно свое направленіе. Сдвиженію электричества въ діэлектрикѣ всегда наступаетъ предѣлъ, когда силы электрической упругости уравновѣсятъ дѣйствіе электрическихъ силъ поля. Эти силы упругости почти совершенно отсутствуютъ, по Максвеллю, у такъ называемыхъ проводниковъ, и потому въ нихъ можетъ возникнуть непрерывное теченіе электричества по одному направленію. Въ діэлектрикахъ же можно поддерживать только токи, непрерывно мѣняющіе свое направленіе

Итакъ, силовыя линіи электрическаго поля представляютъ собою какъ бы направленія струй теченія электричества въ діэлектрикѣ во время образованія поля. Принято для характеристики электрической деформаціи среды строить трубчатыя поверхности, образующими которыхъ служатъ силовыя линіи. Каждая подобная силовая трубка начинается съ поверхности положительно заряженнаго тѣла и заканчивается на поверхности отрицательно заряженнаго тѣла. Детальное разсмотрѣніе свойствъ силовыхъ трубокъ электрическаго поля показываетъ, что положительный и отрицательный заряды, находящіеся въ началѣ и въ концѣ каждой трубки, равны по абсолютной величинѣ. Такимъ образомъ, является представленіе о томъ, что заряды органически связаны между собою при помощи соотвѣтствующей силовой трубки, которую вмѣстѣ съ этими зарядами мы можемъ разсматривать, какъ нѣкоторое самостоятельное цѣлое въ электрическомъ полѣ. Въ виду всего этого оказалось весьма удобнымъ ввести въ науку понятіе о *единичныхъ* трубкахъ въ электрическомъ полѣ, т. е. о такихъ трубкахъ, которыя начинаются съ единицы положительнаго электричества и кончаются на единицѣ отрицательнаго. Эти *единичныя трубки принято называть фарадэевскими.*

Діаграммы электрическихъ силовыхъ линій, представленныя на рисункахъ 131, 132 и 133, можно разсматривать и какъ схемы распредѣленія фарадэевскихъ трубокъ въ различныхъ случаяхъ, считая кривыя линіи за оси трубокъ.

Слѣдуя идеямъ Фарадэя, мы должны приписывать фарадэевскимъ трубкамъ роль нѣкоторыхъ реально существующихъ въ электрическомъ полѣ индивидуумовъ, заполняющихъ весь объемъ діэлектрика. Всѣ свойства электрическаго поля можно объяснять особыми свойствами фарадэевскихъ трубокъ. Такъ, напримѣръ, механическія проявленія электрическаго поля обычно, съ этой точки зрѣнія, разсматриваются, какъ результатъ присущаго фарадэевскимъ трубкамъ стремленія укоротиться подобно упругимъ нитямъ, взаимно при этомъ расталкиваясь. Этимъ весьма удобно объясняется притяженіе разноименно наэлектризованныхъ тѣлъ (рис. 131 и 133) и отталкиваніе одноименно наэлектризованныхъ тѣлъ (рис. 132). Вообще всегда, когда мы имѣемъ дѣло съ электрическими зарядами, мы должны не упускать изъ вида того обстоятельства, что эти заряды никоимъ образомъ немыслимы сами по себѣ; мы всегда должны мысленно связывать съ

ними соотвѣтствующія фарадэевскія трубки. Иногда по чисто формальнымъ причинамъ намъ бываетъ удобнѣе оперировать съ электрическими зарядами, какъ съ чѣмъ-то самостоятельнымъ. Но слѣдуетъ при этомъ помнить, что есть еще и другая сторона явленія.

83. Распредѣленіе электричества на проводящихъ тѣлахъ. — Какъ было указано выше (§ 81), всѣ точки проводника, помѣщеннаго въ электрическомъ полѣ, находящемся въ равновѣсіи, должны имѣть одинъ и тотъ же потенціалъ и, слѣдовательно, электрическая сила внутри такого проводника равна нулю. Другими словами, въ разсматриваемыхъ условіяхъ электрическое поле существуетъ только внѣ проводниковъ, въ діэлектрикѣ. Фарадэевскія трубки поля, начинающіяся или заканчивающіяся на проводникѣ, не проникаютъ внутрь него, но обрываются на самой поверхности. Въ этомъ случаѣ электричество, заряжающее данный проводникъ, распредѣляется только по внѣшней поверхности его. Согласно предыдущему фарадэевскія трубки, связанныя съ электричествомъ на поверхности тѣла, стремясь сократиться, оказываютъ тяженіе, приложенное къ этой поверхности и направленное наружу. Собственно говоря, силы тяженія непосредственно приложены къ отдѣльнымъ элементамъ электрическаго заряда. Однако существуютъ какія-то связи, нормально удерживающія зарядъ на поверхности проводника и не позволяющія ему удаляться подъ дѣйствіемъ натяженія фарадэевскихъ трубокъ.

Если заряженное тѣло представляетъ собою совершенно уединенный шаръ, то связанныя съ нимъ фарадэевскія трубки вполнѣ равномѣрно распредѣляются со всѣхъ сторонъ и на каждую единицу поверхности тѣла приходится одно и то же число трубокъ. Слѣдовательно, въ этомъ случаѣ зарядъ единицы поверхности тѣла — *поверхностная плотность электричества* — сохраняетъ свою величину для всѣхъ частей поверхности. Но если только вблизи даннаго заряженнаго шара находятся другія тѣла, распредѣленіе фарадэевскихъ трубокъ уже не будетъ одинаковымъ со всѣхъ сторонъ (см. рисунки 131 и 132). Не будетъ постоянна въ этомъ случаѣ и поверхностная плотность. Подобное же непостоянство поверхностной плотности электричества, обусловливаемое неравномѣрнымъ распредѣленіемъ фарадэевскихъ трубокъ, всегда имѣетъ мѣсто въ случаѣ тѣлъ сложной формы, въ особенности, когда эти тѣла имѣютъ на своей

поверхности выдающіяся части, острія и т. п. Ясно, что продольное тяженіе фарадэевскихъ трубокъ сгоняетъ ихъ на эти выдающіяся части и острія (рис. 134). Поэтому-то поверхностная плотность электричества на остріяхъ чрезвычайно велика. Кромѣ того, благодаря большой густотѣ фарадэевскихъ трубокъ въ этихъ мѣстахъ, тяженія, испытываемыя элементами электрическаго заряда на концѣ острія, могутъ быть настолько велики, что силы, связывающія электричество съ веществомъ проводника, оказываются уже недостаточными для удержанія электричества на мѣстѣ. Въ этомъ случаѣ обычно наблюдается такъ называемое *истеченіе электричества* съ концовъ острій.

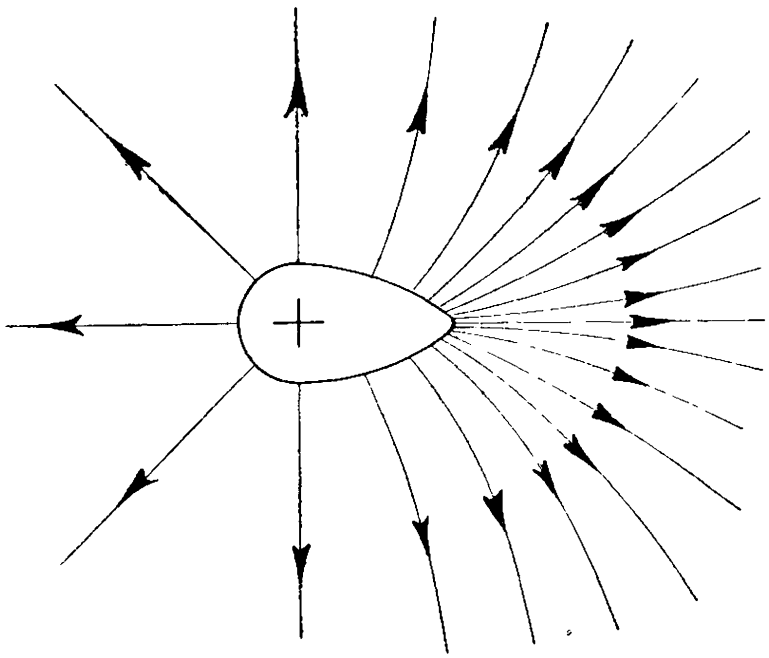


Рис. 134.

Какъ извѣстно, этимъ свойствомъ острій пользуются въ разнаго рода громоотводныхъ приспособленіяхъ.

84. Электризація черезъ вліяніе.—Представимъ себѣ нѣкоторое тѣло, заряженное, напримѣръ, положительно. Фарадэевскія трубки начинающіяся съ поверхности этого тѣла, практически всегда заканчиваются на окружающихъ проводящихъ предметахъ, на которыхъ вслѣдствіе этого обнаруживается электрическій зарядъ знака противоположнаго данному; въ разсматриваемомъ случаѣ это *наведенное* на окружающіе предметы электричество будетъ отрицательное. Описанное явленіе носитъ названіе *электризаціи черезъ вліяніе*. Наведенное электричество другого знака называется иногда *связаннымъ*. Этотъ терминъ вполнѣ соотвѣтствуетъ дѣйствительности, ибо наведенное электричество связано съ зарядомъ даннаго тѣла общими фарадэевскими трубками.

На рисункѣ 135 приведенъ классическій примѣръ электризаціи черезъ вліяніе. Внутрь закрытаго ненаэлектризованнаго металлическаго сосуда, уединеннаго при помощи изолирующей подставки, вводится заряженное, скажемъ положительно, тѣло (можно, напримѣръ, подвѣсить тѣло къ крышкѣ на шелковой нити). При внесеніи его внутрь сосуда всѣ фарадэевскія трубки, которыя начинаются съ даннаго тѣла, будутъ пересѣчены стѣнками сосуда. Но мы знаемъ, что электрическое поле внутри проводника, въ данномъ случаѣ стѣнокъ сосуда, само по себѣ существовать не можетъ. Электрическая деформація въ толщѣ стѣнокъ очень быстро исчезнетъ и въ результатѣ фарадэевскія трубки окажутся въ полномъ смыслѣ разрѣзанными при помощи стѣнокъ. Въ такомъ случаѣ на внутренней поверхности сосуда долженъ оказаться отрицательный зарядъ, а на внѣшней—положительный. Опытъ показываетъ, что это въ дѣйствительности и наблюдается. Вообще *при электризаціи нѣкотораго изолированнаго тѣла черезъ вліяніе на немъ получаются заряды двухъ знаковъ: въ частяхъ, обращенныхъ къ основному заряженному тѣлу, обнаруживается электризація противоположнаго знака, въ частяхъ же удаленныхъ—электризація того же знака.* Наведенная электризація, имѣющая тотъ же знакъ, что и зарядъ наводящаго тѣла, не является связанной; ее можно отвести въ землю и, такимъ образомъ, можно совершенно разрядить наружную поверхность сосуда, изображеннаго на рисункѣ 135.

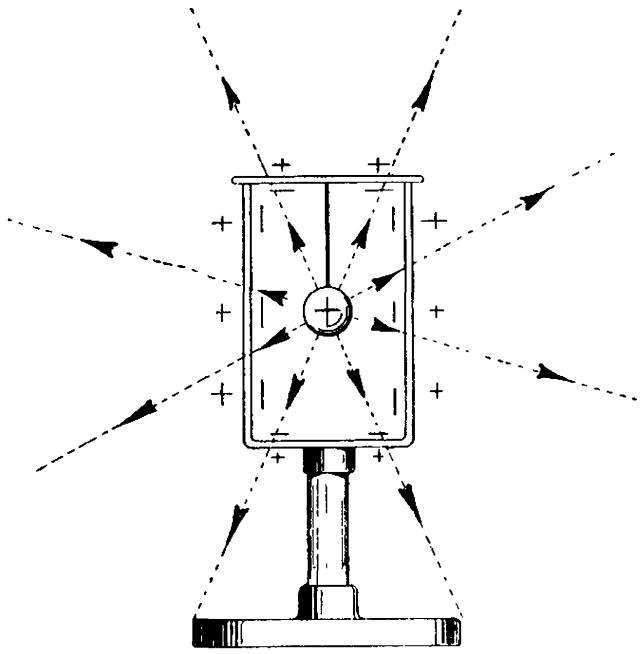


Рис. 135.

Въ описываемомъ опытѣ съ закрытымъ сосудомъ необходимо обратить вниманіе на то обстоятельство, что количество наведеннаго электричества должно быть равно по абсолютной величинѣ количеству наводящаго. Такъ должно быть, ибо всѣ безъ исключенія фарадэевскія трубки, начинающіяся на данномъ тѣлѣ, обязательно заканчиваются на внутренней поверхности сосуда, а вѣдь каждая фарадэевская трубка имѣетъ на

концахъ своихъ единичные заряды разныхъ знаковъ. Равенство наведеннаго и наводящаго зарядовъ по абсолютной величинѣ можетъ быть доказано на опытѣ слѣдующимъ образомъ. Разряжаемъ сначала внѣшнюю поверхность сосуда, соединивъ его съ землей при посредствѣ какого-либо проводника. Прервавъ затѣмъ сообщеніе съ землей, присоединимъ къ сосуду электроскопъ, какъ указатель электризаціи сосуда. Листочки электроскопа будутъ при этомъ, конечно, опущены. Теперь, наклоняя сосудъ, приведемъ заряженный шаръ въ соприкосновеніе съ внутренней поверхностью сосуда. Произойдетъ полная нейтрализація двухъ зарядовъ противоположныхъ знаковъ. Мы не замѣтимъ ни малѣйшаго расхожденія листочковъ электроскопа,

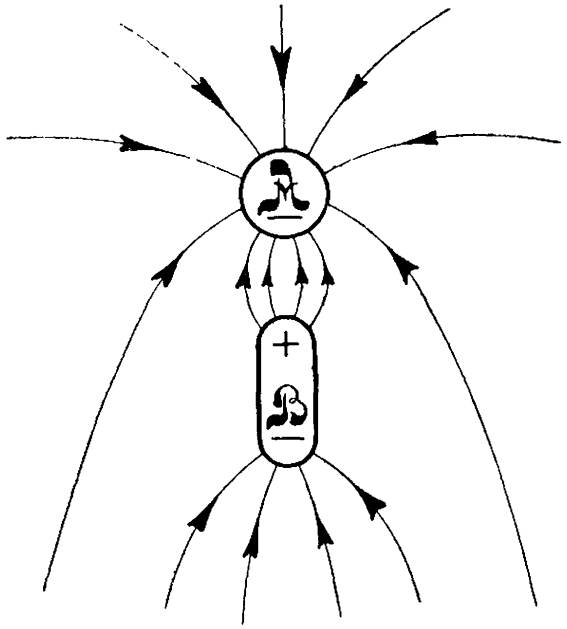


Рис. 136.

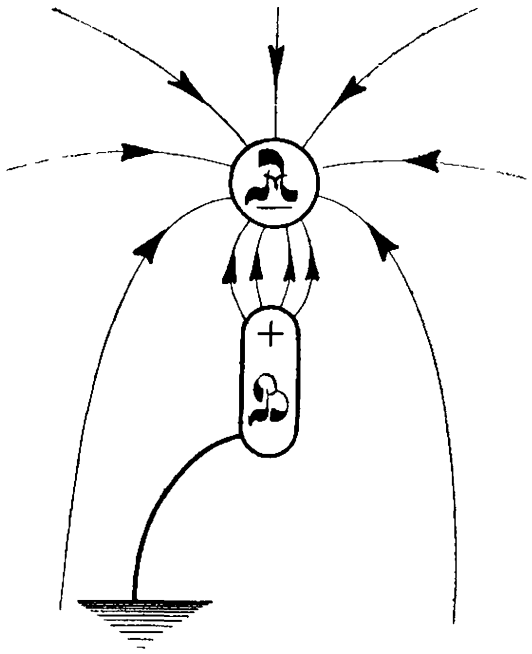


Рис. 137.

соединеннаго съ сосудомъ. Кромѣ того, если теперь вынуть подвѣшенное на шелковой нити тѣло изъ сосуда и поднести его къ другому электроскопу, мы тоже не обнаружимъ ни малѣйшихъ признаковъ электризаціи.

На рисункѣ 136 представлена электризація тѣла *B* черезъ вліяніе въ полѣ заряженнаго тѣла *A*. Въ данномъ случаѣ количество наведеннаго связаннаго электричества меньше количества наводящаго, ибо не всѣ фарадэевскія трубки, связанныя съ поверхностью тѣла *A*, связаны также и съ тѣломъ *B*. На рисункѣ 137 тѣло *B* показано соединеннымъ съ землею при помощи проводника. Благодаря этому наведенное несвязанное электричество (въ данномъ случаѣ отрицательное) «ушло въ землю».

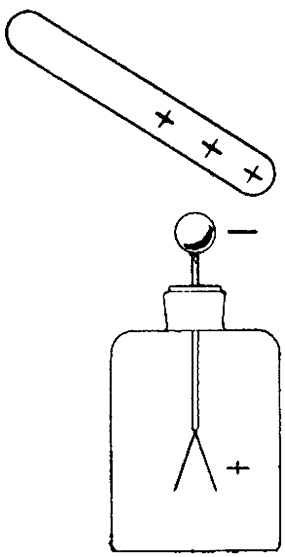


Рис. 138.

На практикѣ весьма часто пользуются электроскопомъ для обнаруженія электрическаго состоянія какого либо тѣла, не приводя ихъ въ непосредственное соприкосновеніе, а лишь приближая заряженное тѣло къ стержню электроскопа (рис. 138). Очевидно, мы тутъ имѣемъ дѣло съ электризаціей черезъ вліяніе. При этомъ на части электроскопа, обращенной къ заряженному тѣлу, наводится зарядъ противоположнаго знака, а на листочкахъ—зарядъ того же знака, что и зарядъ тѣла.

85. Емкость. Единицы емкости.—Представимъ себѣ какія либо два тѣла, напримѣръ два шара (рис. 131) или двѣ параллельныхъ проводящихъ пластинки (рис. 133), заряженныхъ одинаковыми количествами разноименныхъ электричествъ. При этомъ всѣ фарадэевскія трубки, начинающіяся на положительно заряженномъ тѣлѣ, заканчиваются на тѣлѣ, заряженномъ отрицательно. При данной опредѣленной величинѣ каждаго изъ зарядовъ мы имѣемъ нѣкоторую также вполнѣ опредѣленную разность потенціаловъ между двумя разсматриваемыми тѣлами. Увеличивая заряды вдвое, втрое и т. д., мы будемъ получать разности потенціаловъ большія начальной въ два, три и т. д. раза. Такъ должно быть, ибо на основаніи закона Кулона необходимо ожидать, что электрическая сила въ каждой точкѣ поля будетъ возрастать прямо пропорціонально зарядамъ системы наэлектризованныхъ тѣлъ. А слѣдовательно будетъ возрастать прямо-пропорціонально зарядамъ и работа, совершаемая силами поля при перенесеніи единицы положительнаго электричества отъ одного тѣла къ другому (см. опредѣленіе «разности потенціаловъ» въ § 81). Такимъ образомъ обозначая черезъ q зарядъ каждаго изъ двухъ тѣлъ системы и черезъ $V_1 - V_2$ разность потенціаловъ между ними, можемъ написать:

$$q = C.\ (V_1 - V_2).$$

Здѣсь коэффиціентъ пропорціональности согласно принятому обычаю обозначенъ буквою C. Величина C есть нѣкоторая постоянная, характеризующая систему двухъ тѣлъ и имѣющая совершенно опредѣленный физическій смыслъ. Эту по-

стоянную называютъ *электроемкостью* или просто *емкостью* системы двухъ тѣлъ. На основаніи предыдущаго имѣемъ:

$$C = \frac{q}{V_1 - V_2}.$$

Слѣдовательно, *емкость численно выражается величиною заряда, который нужно сообщить каждому изъ двухъ тѣлъ системы для того, чтобы получить разность потенціаловъ между ними, равную единицѣ.*

Нѣкоторая система будетъ обладать электроемкостью, равною единицѣ, если:

$$q = 1$$

и

$$V_1 - V_2 = 1.$$

Эта единица емкости въ практической электромагнитной системѣ называется *фарадой.*

Итакъ, *фарада есть емкость такой системы двухъ тѣлъ, въ которой создастся разность потенціаловъ въ одинъ вольтъ при заряженіи каждаго изъ тѣлъ однимъ кулономъ электричества (соотвѣтственно, положительнаго и отрицательнаго).*

Фарада оказывается емкостью слишкомъ большою для обычныхъ практическихъ условій. Поэтому принято пользоваться въ качествѣ вспомогательной единицы милліонной долей фарады. Называютъ эту послѣднюю *микрофарадой.* Такимъ образомъ:

$$1 \text{ микрофарада} = 10^{-6} \text{ фарады}.$$

Емкость данной системы зависитъ прежде всего отъ геометрическихъ размѣровъ ея. Емкость будетъ тѣмъ больше, чѣмъ больше поверхность обоихъ тѣлъ. Кромѣ того емкость весьма существенно зависитъ отъ разстоянія между тѣлами системы. Дѣйствительно, допустимъ, что мы уменьшаемъ разстояніе, сохраняя неизмѣнной величину зарядовъ. Представимъ себѣ далѣе, что единица положительнаго электричества передвигается силами поля отъ тѣла, положительно заряженнаго, къ тѣлу, заряженному отрицательно. Разсматривая электрическую силу въ нѣкоторой точкѣ поля, какъ результирующую двухъ составляющихъ, каждая изъ которыхъ обусловливается въ отдѣльности каждымъ изъ зарядовъ, мы должны придти къ заключенію, что работа каждой изъ составляющихъ, совершаемая при передвиженіи

единицы электричества, будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше путь, проходимый этимъ единичнымъ зарядомъ отъ одного тѣла до другого. Слѣдовательно и работа результирующей силы при перемѣщеніи единичнаго заряда—разность потенціаловъ—будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше разстояніе между тѣлами. Но такъ какъ:

$$C = \frac{q}{V_1 - V_2},$$

то слѣдовательно емкость системы растетъ при этихъ условіяхъ. Такимъ образомъ, для полученія разности потенціаловъ въ 1 вольтъ нужно сообщить тѣламъ заряды тѣмъ большіе, чѣмъ меньше разстояніе между ними и чѣмъ больше ихъ поверхность. Система, состоящая изъ двухъ по возможности сближенныхъ проводящихъ поверхностей большого размѣра (схема этого расположенія показана на рисункѣ 133) позволяетъ, такъ сказать, запасти или накопить большія количества электричества при сравнительно небольшой разности потенціаловъ. Въ виду этого такія системы называются *конденсаторами*. На рисункѣ 133 показанъ, собственно говоря, подобный конденсаторъ съ воздушной изоляціей. Обыкновенно однако въ конденсаторахъ металлическія пластины или, какъ ихъ называютъ, *обкладки* раздѣляются одна отъ другой при посредствѣ какого-либо твердаго діэлектрика въ формѣ листовъ или пластинокъ, напримѣръ парафинированной бумагой, стекломъ, слюдой и т. д. Классическій примѣръ подобнаго конденсатора мы имѣемъ въ такъ называемой *лейденской банкѣ*, представляющей собою стеклянный сосудъ, обклеенный снаружи и внутри станіолемъ.

Твердый діэлектрикъ, примѣняемый въ конденсаторахъ, играетъ важную роль въ томъ отношеніи, что вещество того изолятора, который раздѣляетъ обкладки, какъ показалъ Фарадэй, весьма сильно вліяетъ на величину емкости конденсатора. Въ этомъ мы должны усматривать одно изъ доказательствъ участія промежуточной среды въ электрическихъ явленіяхъ. Емкость конденсатора возрастаетъ, вообще говоря, въ нѣсколько разъ при замѣнѣ воздушнаго слоя, раздѣляющаго обкладки, такимъ діэлектрикомъ, какъ парафинъ, слюда, стекло и т. п. *Принято называть діэлектрической постоянной вещества отношеніе емкости конденсатора, у котораго все пространство между пластинами заполнено этимъ изолирующимъ веществомъ,*

къ емкости того же конденсатора, у котораго все пространство между его пластинами заполнено воздухомъ.

Тотъ коэфиціентъ k, который мы ввели въ формулу Кулона для электрическихъ взаимодѣйствій (§ 78), есть именно діэлектрическая постоянная. Это весьма важная характеристика свойствъ среды въ отношеніи ея участія въ электрическихъ явленіяхъ. Въ нижеслѣдующей таблицѣ приведены значенія діэлектрическихъ постоянныхъ нѣкоторыхъ тѣлъ:

Параффинъ	около 2
Эбонитъ	» 3
Сѣра	3,97
Слюда	6,6
Стекло	отъ 5 до 7
Алкоголь	26
Дистиллированная вода .	76

86. Энергія заряда.—Заряжая нѣкоторый конденсаторъ, мы всегда совершаемъ работу, которая идетъ на созданіе электрической деформаціи въ діэлектрикѣ конденсатора. Обратно, соединяя обкладки конденсатора проводникомъ и разряжая его при этомъ, мы возвращаемъ себѣ эту работу. Мы получаемъ ее обычно въ формѣ энергіи электрическаго тока въ проводникѣ, а затѣмъ за счетъ этой энергіи нагрѣвается проводникъ. Итакъ, заряженный конденсаторъ обладаетъ нѣкоторымъ запасомъ энергіи, которымъ онъ не обладалъ, пока разность потенціаловъ между его обкладками была равна нулю.

Нетрудно разсчитать этотъ запасъ энергіи. Представимъ себѣ нѣкоторый конденсаторъ, зарядъ котораго есть q, а разность потенціаловъ между обкладками $V_1 - V_2$. Допустимъ далѣе, что этотъ конденсаторъ разряжается, будучи замкнутъ какимъ либо проводникомъ. Ради простоты допустимъ при этомъ что процессъ разряженія конденсатора состоитъ въ слѣдующемъ. Отрицательное электричество $(-q)$ остается на одной изъ обкладокъ неподвижно, а положительное электричество постепенно притекаетъ къ этой обкладкѣ по проводнику. Когда наконецъ все положительное электричество $(+q)$ такимъ образомъ перетечетъ, обѣ окладки окажутся въ нейтральномъ состояніи, т. е. конденсаторъ будетъ разряженъ. Ясно, что во все время разряженія конденсатора разность потенціаловъ будетъ непрерывно падать отъ начальнаго значенія $V_1 - V_2$ до

нуля. Изобразимъ это графически. Пусть вдоль оси абсциссъ (рис. 139) откладывается количество протекшаго по проводнику электричества, а по оси ординатъ—разность потенціаловъ. По мѣрѣ возрастанія количества протекшаго электричества разность потенціаловъ падаетъ по закону, изображаемому графически прямою линіею, ибо между измѣненіями заряда конден-

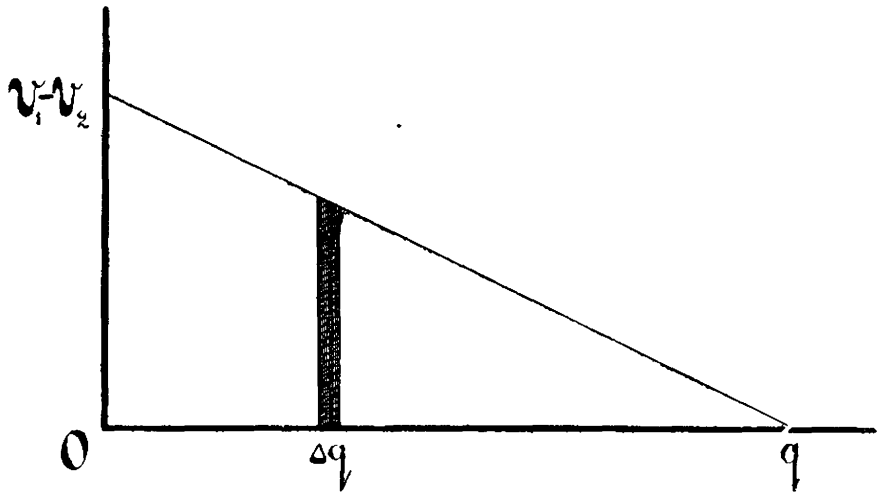


Рис. 139.

сатора и измѣненіями разности потенціаловъ между его обкладками должна существовать линейная зависимость въ силу соотношенія:

$$q = C \cdot (V_1 - V_2).$$

Электрическая энергія, выдѣляемая въ проводникѣ за время протеканія количества электричества Δq, очевидно изобразится заштрихованной площадкой, высота которой есть соотвѣтствующая разность потенціаловъ. Полная же энергія, развившаяся за все время разряженія конденсатора, выразится суммою всѣхъ такихъ элементарныхъ площадокъ, т. е. площадью прямоугольнаго треугольника, основаніе котораго есть q и высота $V_1 - V_2$. Слѣдовательно, запасъ энергіи въ заряженномъ конденсаторѣ равенъ:

$$A = \frac{1}{2} q \cdot (V_1 - V_2) =$$

$$= \frac{1}{2} C \cdot (V_1 - V_2)^2.$$

87. Соотношеніе между электрическимъ полемъ и полемъ магнитнымъ.—Мы знаемъ, что и электрическія, и магнитныя явленія совершаются при ближайшемъ участіи среды, заполняющей пространство. Каждая изъ этихъ группъ явленій обу-

словливается повидимому какимъ-то специфическимъ состояніемъ среды. Но несомнѣнно, что между электрическимъ и магнитнымъ полемъ должна быть тѣсная связь. Дѣйствительно, весьма часто оба эти поля сосуществуютъ, они наблюдаются въ одномъ и томъ же мѣстѣ, въ одно и то же время. Это, напримѣръ, мы обычно имѣемъ въ случаѣ электрическаго тока: вокругъ проводника съ токомъ всегда есть магнитное поле и при наличности разности потенціаловъ между отдѣльными точками проводника тамъ же одновременно можетъ быть обнаружено и поле электрическое. Такъ какъ одна и та же среда принимаетъ непосредственное участіе въ тѣхъ процессахъ, которые имѣютъ мѣсто и въ электрическомъ, и въ магнитномъ полѣ, то необходимо признать, что специфическія состоянія среды, обусловливающія каждое изъ этихъ полей, отнюдь не исключаютъ одно другого, но напротивъ при соотвѣтствующихъ условіяхъ могутъ взаимно дополнять другъ друга, представляя при этомъ какъ бы отдѣльныя стороны одного и того же сложнаго процесса.

И теорія, и опытъ позволяютъ высказать слѣдующее положеніе:

Всякое измѣненіе, всякое движеніе магнитнаго поля сопровождается возникновеніемъ поля электрическаго и обратно при всякомъ измѣненіи или движеніи поля электрическаго можно обнаружить поле магнитное: въ обоихъ случаяхъ возникаетъ электромагнитное поле.

Электродвижущая сила индукціи является однимъ изъ примѣровъ, подтверждающихъ это общее положеніе. Можно сослаться далѣе на то, что, какъ показываютъ тщательные опыты, всякое движеніе заряженнаго тѣла даетъ начало магнитному полю.

Существованіе электромагнитнаго поля вокругъ проводника съ токомъ является однимъ изъ главнѣйшихъ поводовъ къ утвержденію, что электрическій токъ есть процессъ кинетическаго характера. Не подлежитъ сомнѣнію, что въ полѣ тока происходитъ нѣкоторое движеніе. Что̀ именно движется и какъ именно происходитъ это движеніе,—мы не знаемъ. При современномъ состояніи науки можно только высказывать тѣ или иныя предположенія относительно механизма электромагнитнаго поля. Въ этомъ отношеніи можно указать на гипотезу Пойнтинга, согласно которой процессъ, происходящій въ полѣ тока,

состоитъ въ томъ, что фарадэевскія трубки, вырабатываемыя генераторомъ тока, распространяются отъ него, скользя концами по проводамъ и мало-по-малу концами же проникая внутрь проводовъ, гдѣ энергія, несомая ими, превращается въ тепло (джулево тепло). Магнитное поле вокругъ проводника, по Пойнтингу, есть лишь форма воспріятія нами движенія фарадэевскихъ трубокъ: *мы обнаруживаемъ магнитное поле, перпендикулярное плоскости, опредѣляемой направленіемъ фарадэевскихъ трубокъ и направленіемъ ихъ движенія.* Съ этой точки зрѣнія энергія передается отъ генератора къ пріемнику черезъ діэлектрикъ. Провода же играютъ роль направляющихъ этого потока энергіи. Въ слѣдующей главѣ мы познакомимся съ распространеніемъ электромагнитной энергіи безъ посредства какихъ бы то ни было направляющихъ.

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

Электрическія колебанія.

---

88. Перемѣнный токъ въ цѣпи съ самоиндукціей и емкостью. — Представимъ себѣ электрическую цѣпь, схематически показанную на рисункѣ 140. Она отличается отъ цѣпи, изученной нами въ § 74, только тѣмъ, что здѣсь послѣдовательно съ сопротивленіемъ r и самоиндукціей L включенъ еще конденсаторъ съ емкостью C. На основаніи изложеннаго въ предыдущей главѣ (см. § 82) ясно, что мы не можемъ въ такой цѣпи под-

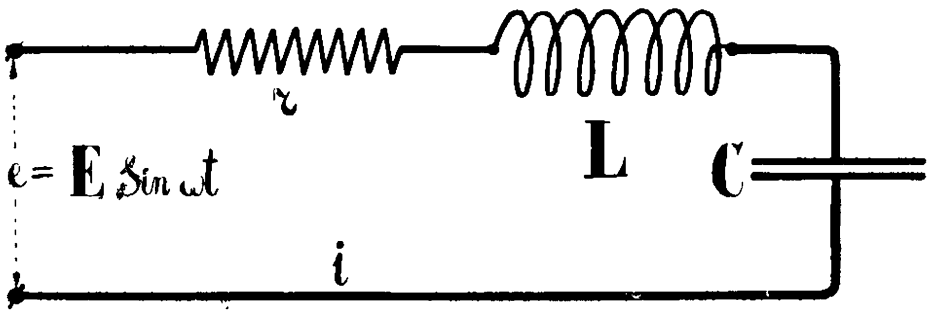


Рис. 140.

держивать сколь угодно долго токъ неизмѣннаго направленія, ибо электрическое смѣщеніе въ діэлектрикѣ конденсатора не можетъ безгранично увеличиваться при данномъ значеніи приложенной къ зажимамъ цѣпи электродвижущей силы. Въ этомъ случаѣ токъ будетъ проходить по цѣпи только до тѣхъ поръ, пока конденсаторъ заряжается и пока разность потенціаловъ между его обкладками еще не сдѣлалась равной внѣшней э.-д. силѣ, приложенной къ зажимамъ цѣпи. Но если эта внѣшняя э.-д. сила будетъ непрерывно измѣнять свое направленіе, то конденсаторъ будетъ попеременно заряжаться и разряжаться и по цѣпи все время будетъ проходить перемѣнный токъ. По-

добный случай мы и разсмотримъ подробнѣе. При этомъ допустимъ, что между зажимами цѣпи дѣйствуетъ гармонически измѣняющаяся э.-д. сила:

$$e = E \sin \omega t,$$

гдѣ:

$$\omega = 2\pi N.$$

Сила тока въ каждый данный моментъ должна выражаться слѣдующимъ образомъ:

$$i = \frac{\Sigma e}{r}.$$

Въ составъ суммы э.-д. силъ войдетъ, во-первыхъ, внѣшняя э.-д. сила e, во-вторыхъ, обратная э.-д. сила самоиндукціи $-L\frac{di}{dt}$ и, въ-третьихъ, разность потенціаловъ между обкладками конденсатора, которая въ каждый моментъ равна:

$$\frac{1}{C}q,$$

гдѣ q есть зарядъ конденсатора. При суммированіи э.-д. силъ мы должны эту разность потенціаловъ взять со знакомъ (—), ибо она характеризуетъ степень того противодѣйствія, которое оказываетъ внѣшней э.-д. силѣ e электрическая упругость діэлектрика конденсатора. Итакъ, имѣемъ:

$$i = \frac{e - L\frac{di}{dt} - \frac{1}{C}q}{r}.$$

Отсюда получаемъ:

$$L\frac{di}{dt} + ri + \frac{1}{C}q = E \sin \omega t.$$

Это соотношеніе показываетъ, что внѣшняя э.-д. сила въ каждый данный моментъ представляетъ собою сумму трехъ слагаемыхъ. Первое слагаемое есть та часть внѣшней э.-д. силы, которая идетъ на преодолѣніе обратной э.-д. силы самоиндукціи; второе слагаемое есть омическое паденіе напряженія, обусловленное сопротивленіемъ r; третье слагаемое—та часть внѣшней э.-д. силы, которая идетъ на преодолѣніе противодѣйствующей разности потенціаловъ у зажимовъ конденсатора.

Для рѣшенія вопроса о томъ, какъ въ данномъ случаѣ выражается сила тока, приведемъ сначала вышенаписанное уравненіе къ болѣе удобному виду. Съ этою цѣлью возьмемъ производную по времени отъ правой и лѣвой частей:

$$L\frac{d^2i}{dt^2}+r\frac{di}{dt}+\frac{1}{C}\frac{dq}{dt}=\omega E\cos\omega t.$$

Но на основаніи § 37 имѣемъ:

$$\frac{dq}{dt}=i.$$

Такимъ образомъ, уравненіе приводится къ виду:

$$L\frac{d^2i}{dt^2}+r\frac{di}{dt}+\frac{1}{C}i=\omega E\cos\omega t.$$

Совершенно подобно тому, какъ и въ случаѣ, разобранномъ въ § 74, полное рѣшеніе этого уравненія представляетъ интересъ лишь при изученіи начальныхъ условій въ электрической цѣпи. Для ознакомленія же съ характеромъ установившагося режима достаточно знать частное рѣшеніе. Тѣ же соображенія, которыми мы руководствовались при разысканіи частнаго рѣшенія въ вышеупомянутомъ случаѣ, позволяютъ намъ утверждать, что и теперь частное рѣшеніе должно имѣть видъ:

$$i=I\sin(\omega t-\varphi).$$

И въ настоящемъ случаѣ для опредѣленія значенія постоянныхъ I и φ мы подставимъ въ основное уравненіе выраженія для силы тока и ея производныхъ. Получаемъ тождество, изъ котораго послѣ надлежащихъ преобразованій имѣемъ:

$$I=\frac{E}{\sqrt{r^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{r}.$$

И въ данномъ случаѣ выраженіе:

$$z=\sqrt{r^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

называется полнымъ сопротивленіемъ.

Мы видимъ, что величины I и φ зависятъ отъ соотношенія между L и C. Характеръ этого соотношенія зависитъ отъ частоты N. Если имѣемъ:

$$\omega L > \frac{1}{\omega C},$$

то говорятъ, что *доминируетъ самоиндукція*. Это значитъ, что въ настоящемъ случаѣ соотношенія между токомъ и э.-д. силой получаются такія же, какъ если бы въ цѣпи совершенно отсутствовалъ конденсаторъ и была только самоиндукція. Именно, мы имѣемъ:

$$\varphi > 0,$$

т. е. токъ запаздываетъ относительно э.-д. силы. Кривыя э.-д. силы и тока располагаются, какъ показано на рисункѣ 120.

Если же:

$$\omega L < \frac{1}{\omega C},$$

то очевидно имѣемъ:

$$\varphi < 0$$

и токъ упреждаетъ э.-д. силу. При этомъ, какъ говорятъ, въ цѣпи *доминируетъ емкость*. Соотвѣтствующее этому случаю расположеніе кривыхъ э.-д. силы и тока показано на рисункѣ 141.

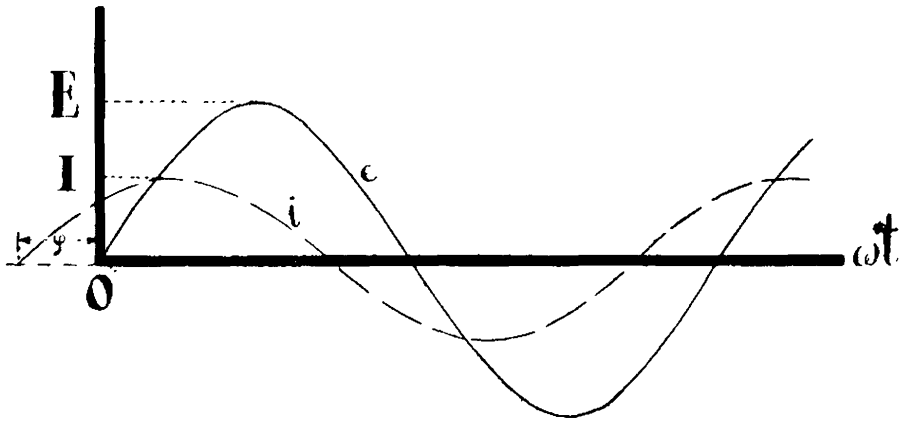


Рис. 141.

Мы видимъ, что емкость антагонируетъ съ самоиндукціей и результатъ сильно зависитъ отъ того, на чьей сторонѣ перевѣсъ.

89. Резонансъ. — При нѣкоторой опредѣленной частотѣ N, подбирая соотвѣтствующимъ образомъ L и C, мы всегда можемъ добиться того, чтобы имѣло мѣсто соотношеніе:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0.$$

Въ этомъ случаѣ получаемъ:

$$z = r,$$

$$I = \frac{E}{r},$$

$$\varphi = 0.$$

При незначительномъ сопротивленіи r амплитуда тока можетъ достигнуть очень большихъ значеній. Въ разсматриваемомъ случаѣ все происходитъ такъ, какъ если бы въ цѣпи не было ни самоиндукціи, ни емкости. Онѣ взаимно компенсируютъ одна другую: токъ оказывается въ фазѣ съ э.-д. силой и амплитуда тока имѣетъ наибольшее возможное при данныхъ E и r значеніе. Внѣшней э.-д. силѣ не приходится преодолѣвать ни электромагнитной инерціи, характеризуемой коэффиціентомъ L, ни упругихъ силъ діэлектрика конденсатора, характеризуемыхъ величиною $\frac{1}{C}$. И электромагнитная инерція, и электрическая упругость не оказываютъ противодѣйствія внѣшней э.-д. силѣ потому, что въ настоящемъ случаѣ благодаря соотвѣтствующему подбору этихъ величинъ электрическая цѣпь *резонируетъ* на пульсаціи, сообщаемыя ей внѣшней вынуждающей э.-д. силой. Это явленіе *резонанса* въ электрической цѣпи совершенно аналогично резонансу въ матеріальныхъ системахъ. Много примѣровъ подобнаго резонанса можно подыскать въ области звуковыхъ колебаній. Такъ, напримѣръ, камертонъ или натянутая струна резонируютъ на нѣкоторый опредѣленный тонъ, если ихъ массы и упругость соотвѣтствующимъ образомъ подобраны. При этомъ для осуществленія условій резонанса необходимо, какъ мы знаемъ, чтобы періодъ собственныхъ незатухающихъ колебаній камертона или струны равнялся періоду внѣшней вынуждающей силы, въ данномъ случаѣ звуковыхъ колебаній воздуха, непосредственно дѣйствующихъ на поверхность резонирующихъ тѣлъ. Опытъ и теорія показываютъ, что и во всякой электрической цѣпи, обладающей емкостью и самоиндукціей, могутъ, вообще говоря, возникнуть самостоятельныя *электрическія колебанія*. Эти электрическія колебаніи въ цѣпи представляютъ собою не что иное, какъ перемѣнный токъ, протекающій по цѣпи безъ всякаго участія внѣшней вынуждающей э.-д. силы. Такимъ образомъ, въ моментъ резонанса внѣшней вынуждающей э.-д. силѣ приходится преодолѣвать

только сопротивленіе r, ибо благодаря надлежащему подбору L и C цѣпь сама по себѣ способна колебаться съ періодомъ, какъ разъ соотвѣтствующимъ періоду э.-д. силы, приложенной къ зажимамъ цѣпи.

90. Свободныя колебанія въ электрической цѣпи. — Періодъ собственныхъ свободныхъ колебаній цѣпи легко вычислить, исходя изъ условій резонанса:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0.$$

Именно, подставляемъ сюда:

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

гдѣ T представляетъ собою, вообще говоря, періодъ внѣшней вынуждающей силы, а въ моментъ резонанса также и періодъ собственныхъ незатухающихъ колебаній электромагнитной системы. Отсюда получаемъ:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Какъ было указано выше, это есть періодъ собственныхъ *незатухающихъ* колебаній. По этому поводу нужно замѣтить слѣдующее. Вообще говоря, свободныя колебанія электрической цѣпи всегда бываютъ *затухающими*, т. е. амплитуды отдѣльныхъ пульсацій тока непрерывно уменьшаются, ассимптотически стремясь къ нулю. Это происходитъ отъ того, что всякая реальная цѣпь обладаетъ сопротивленіемъ r, обусловливающимъ непрерывный расходъ энергіи, которая черпается изъ начальнаго запаса ея, сообщеннаго системѣ. Примѣръ подобныхъ условій мы имѣемъ въ случаѣ такъ называемаго колебательнаго разряда конденсатора, заряженнаго предварительно до нѣкоторой разности потенціаловъ и затѣмъ замкнутаго при помощи рубильника K на цѣпь съ самоиндукціей (рис. 142). Вліяніе сопротивленія r на характеръ явленія настолько велико, что въ случаѣ слишкомъ большого значенія r электрическія колебанія могутъ даже совсѣмъ не возникнуть: конденсаторъ разрядится

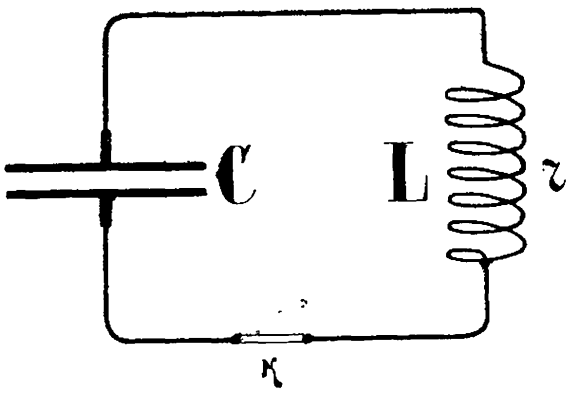


Рис. 142.

токомъ одного неизмѣннаго направленія совершенно подобно тому, какъ и всякая матеріальная система, способная колебаться и выведенная изъ состоянія равновѣсія, возвращается къ нему безъ всякихъ колебаній, если сопротивленіе окружающей среды чрезмѣрно велико. Итакъ, для возникновенія въ цѣпи электрическихъ колебаній безусловно необходимо, чтобы r не было слишкомъ велико. При соблюденіи этого условія электрическія колебанія возникаютъ и затуханіе ихъ будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше r. Въ предѣлѣ, въ идеальномъ случаѣ, когда:

$$r = 0,$$

затуханіе отсутствуетъ и мы имѣемъ *свободныя незатухающія колебанія* системы. Какъ показываетъ подробное изслѣдованіе, на величину поріода колебаній электрической цѣпи вліяетъ не только самоиндукція и емкость, но также и сопротивленіе r; именно сопротивленіе нѣсколько удлиняетъ періодъ колебанія. Только въ томъ случаѣ, когда:

$$r = 0,$$

мы имѣемъ періодъ:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Тотъ фактъ, что моментъ резонанса опредѣляется совпаденіемъ періода внѣшней вынуждающей э.-д. силы съ періодомъ собственныхъ *незатухающихъ* колебаній системы, хотя бы система и обладала какимъ угодно сопротивленіемъ r, можно объяснить слѣдующимъ образомъ. Въ разсматриваемомъ случаѣ энергія, которая поглощается сопротивленіемъ r, непрерывно возмѣщается благодаря притоку ея извнѣ, отъ генератора, и потому то количество энергіи, которое участвуетъ въ явленіи электрическихъ колебаній, претерпѣвая непрерывныя превращенія изъ формы энергіи заряда конденсатора въ форму энергіи электрическаго тока и обратно, можно считать неубывающимъ: въ отношеніи собственныхъ колебаній системы все обстоитъ такъ, какъ если бы мы имѣли:

$$r = 0.$$

Практически въ случаѣ свободныхъ колебаній въ независимой электрической цѣпи (рис. 142) очень часто пренебрегаютъ вліяніемъ сопротивленія на величину періода и приближенно полагаютъ:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Для осуществленія подобныхъ колебаній до настоящаго времени пользуются обыкновенно расположеніемъ, примѣръ котораго представленъ на рисункѣ 143. Вмѣсто ключа K, фигурирующаго на схемѣ рисунка 142, здѣсь періодическія замыканія цѣпи конденсатора автоматически осуществляются черезъ *искровой промежутокъ ab*. Для сообщенія конденсатору первоначальнаго запаса энергіи, для заряженія его, служатъ показанные пунктиромъ провода, ведущіе къ обкладкамъ конденсатора отъ зажимовъ высоковольтной обмотки трансформатора или катушки Румкорфа. Такимъ образомъ, конденсаторъ періодически заряжается до нѣкоторой достаточно высокой разности потенціаловъ, при которой, наконецъ, происходитъ *пробой* діэлектрика — воздуха между шариками *a* и *b*. Между этими шариками появляется *искра*, представляющая сравнительно небольшое сопротивленіе и замыкающая собою колебательную цѣпь конденсатора. Электрическія колебанія практически затухаютъ и искра исчезаетъ къ моменту слѣдующаго заряженія конденсатора отъ трансформатора или катушки Румкорфа, все вновь повторяется и т. д.

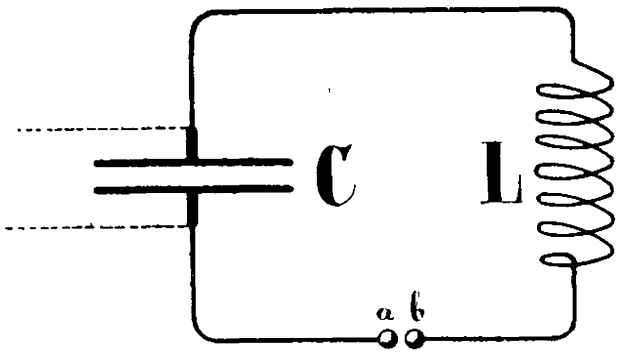


Рис. 143.

Оставляя въ сторонѣ вопросъ о расходованіи энергіи благодаря сопротивленію цѣпи, пренебрегая этимъ, разсмотримъ вкратцѣ тѣ главныя превращенія, которымъ періодически подвергается энергія, сообщенная системѣ извнѣ. Когда конденсаторъ заряжается, ему сообщается извнѣ запасъ энергіи, равный (см. § 86):

$$A = \frac{1}{2} C(V_1 - V_2)^2.$$

Во время разряженія конденсатора черезъ цѣпь съ самоиндукціей L токъ не сразу достигаетъ наибольшаго значенія, а наростаетъ постепенно. Растетъ мало-по-малу (за счетъ убыванія энергіи конденсатора) и энергія электрическаго тока (см. § 72), достигающая наибольшаго значенія:

$$\frac{1}{2} LI^2,$$

когда конденсаторъ совсѣмъ разрядится. Пренебрегая разсѣяніемъ энергіи, можемъ, слѣдовательно, написать:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}C(V_1 - V_2)^2,$$

т. е. энергія тока цѣликомъ возникла за счетъ первоначальнаго запаса энергіи въ конденсаторѣ. Несмотря на то, что конденсаторъ разрядился, токъ въ цѣпи будетъ поддерживаться по прежнему направленію, благодаря электромагнитной инерціи. Нетрудно видѣть, что конденсаторъ при этомъ начнетъ перезаряжаться и, въ концѣ концовъ, когда токъ, наконецъ, прекратится по случаю полнаго израсходованія его энергіи, конденсаторъ окажется заряженнымъ до первоначальной разности потенціаловъ, но только знакъ этой разности потенціаловъ будетъ обратный. Вмѣстѣ съ тѣмъ въ конденсаторѣ сосредоточится первоначальный запасъ энергіи. Затѣмъ вновь въ цѣпи возникнетъ токъ, но только обратнаго направленія, конденсаторъ разрядится, опять перезарядится и т. д.

91. Электромагнитныя волны. — Въ предыдущемъ, говоря о разсѣяніи энергіи при процессѣ электрическихъ колебаній, мы имѣли въ виду только нагрѣваніе проводника колебательной цѣпи, обусловливаемое его сопротивленіемъ. Опытъ показываетъ однако, что есть еще другой факторъ, вызывающій разсѣяніе энергіи и имѣющій при благопріятныхъ условіяхъ первенствующее значеніе. Дѣло въ томъ, что тѣ явленія, которыя имѣютъ мѣсто въ колеблющейся электрической цѣпи, не ограничиваются однимъ лишь контуромъ цѣпи въ узкомъ смыслѣ этого слова, но происходятъ во всемъ окружающемъ пространствѣ, теоретически безпредѣльномъ. Среда, заполняющая это пространство, принимаетъ самое дѣятельное участіе въ явленіи перемѣннаго электромагнитнаго поля, связаннаго съ разсматриваемою цѣпью. И при этомъ часть энергіи разсѣивается или, какъ говорятъ, *излучается* въ окружающее пространство. Эта энергія является потерянной для данной колеблющейся цѣпи. Все происходитъ совершенно аналогично тому, какъ звучащій камертонъ или колеблющаяся струна мало-по-малу теряютъ энергію своихъ колебаній не столько вслѣдствіе сопротивленія среды въ узкомъ смыслѣ сколько, главнымъ образомъ, благодаря распространенію звуковыхъ колебаній въ воздухѣ по всему окружающему пространству.

Мощность потока энергіи, излучаемой колеблющейся электрическою цѣпью, такъ называемымъ *вибраторомъ*, зависитъ въ значительной степени отъ геометрическихъ размѣровъ и формы цѣпи. Въ настоящее время для достиженія достаточно мощнаго электромагнитнаго излученія, что бываетъ необходимо при практическомъ использованіи описываемаго явленія, примѣняютъ вибраторы, въ которыхъ роль обкладокъ конденсатора играютъ проводящія тѣла, удаленныя одно отъ другого на сравнительно большое разстояніе. Электрическое поле «между обкладками конденсатора» захватываетъ въ этомъ случаѣ большую область, въ связи съ чѣмъ облегчается отдѣленіе энергіи отъ вибратора. На рисункѣ 144 представленъ схематически подобный *открытый вибраторъ*, состоящій изъ двухъ длинныхъ проводящихъ стержней A и B, раздѣленныхъ искровымъ промежуткомъ. Роль про-

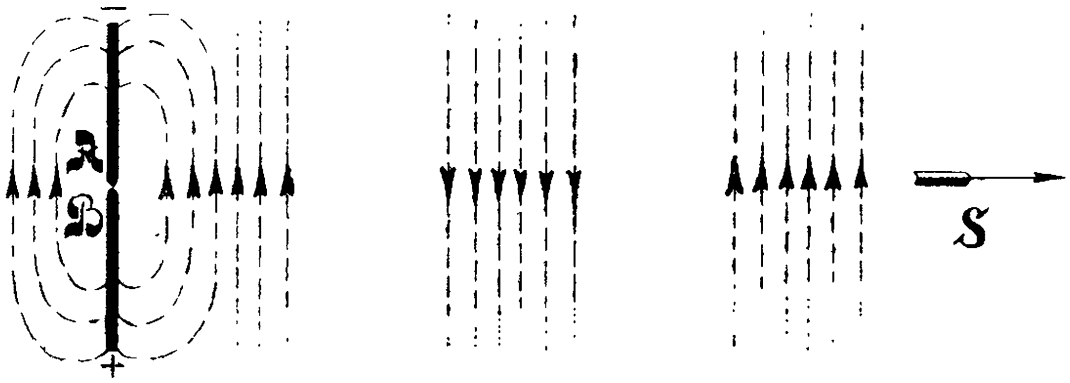


Рис. 144.

водовъ цѣпи играютъ эти длинные стержни. «Діэлектрикомъ конденсатора» служитъ вся окружающая среда. Ради упрощенія, здѣсь не показаны проводники отъ трансформатора, питающаго энергіей нашъ вибраторъ. Допустимъ, что вибраторъ работаетъ, т. е. въ немъ происходятъ электрическія колебанія. Верхній и нижній стержни непрерывно перезаряжаются и вмѣстѣ съ тѣмъ непрерывно періодически измѣняется по величинѣ и направленію электрическое смѣщеніе (см. § 82) въ пространствѣ, окружающемъ вибраторъ. На рисункѣ 144 чисто схематически представленъ характеръ электрическаго поля вокругъ вибратора въ моментъ, когда нижній стержень заряженъ положительно, а верхній — отрицательно. Пунктиромъ показана система фарадэевскихъ трубокъ. Стрѣлки указываютъ направленіе электрическаго смѣщенія вдоль этихъ трубокъ. Электрическое смѣщеніе представляетъ собою упругую деформацію, которая стремится со свойственною ей скоростью распространиться по всему окружающему

пространству. Непрерывное колебательное измѣненіе смѣщенія вблизи вибратора, связанное съ его перезаряженіемъ, сопровождается распространеніемъ электрическихъ колебаній во всѣ стороны отъ вибратора. По Пойнтингу, все происходитъ такъ, какъ будто бы нѣкоторыя фарадэевскія трубки, теряя связь съ вибраторомъ, отдѣляются отъ него и движутся по направленію, перпендикулярному своей длинѣ и показанному стрѣлкой S на рисункѣ 144. Ясно конечно, что въ виду періодическаго перезаряженія вибратора, отъ него отдѣляются группы фарадэевскихъ трубокъ поперемѣнно то одного направленія, то другого. Въ § 87 было указано, что при движеніи фарадэевскихъ трубокъ обнаруживается магнитное поле, перпендикулярное плоскости, опредѣляемой направленіемъ фарадэевскихъ трубокъ и направленіемъ ихъ движенія. Такимъ образомъ, въ разсматриваемомъ случаѣ при распространеніи электрическихъ колебаній имъ сопутствуетъ магнитное поле и притомъ также поперемѣнно направленное въ противоположныя стороны. Мы имѣемъ дѣло въ сущности съ *электромагнитными колебаніями*, съ *электромагнитными волнами*, излучаемыми вибраторомъ. И электрическія, и магнитныя колебанія совершаются въ направленіяхъ взаимно-перпендикулярныхъ и въ то же время перпендикулярныхъ направленію ихъ распространенія. Другими словами, электромагнитныя колебанія суть колебанія поперечныя.

Опытъ показываетъ, что скорость распространенія электромагнитныхъ волнъ въ пустотѣ равна:

$$v = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{ск.}},$$

т. е. 300 000 километровъ въ секунду. А это представляетъ собою какъ разъ скорость свѣта въ пустотѣ. Совпаденіе этихъ двухъ скоростей навело Максвелля на мысль, что самъ свѣтъ есть нѣкоторое электромагнитное явленіе и что свѣтовая волна представляетъ собою не что иное, какъ именно электромагнитную волну. Произведенныя Герцомъ опытныя изслѣдованія свойствъ электромагнитныхъ волнъ, ихъ отраженія, преломленія и поляризаціи, составляютъ весьма серьезный доводъ въ пользу теоріи Маскwелля, ибо изъ этихъ опытовъ вытекаетъ, что электромагнитныя волны вполнѣ подобны свѣтовымъ. Вся разница между тѣми волнами, которыя излучаются обычными электрическими вибраторами, и тѣми волнами, которыя излучаются источ-

никами свѣта, заключается въ томъ, что длины волнъ въ одномъ и другомъ случаѣ неодинаковы. Герцу удалось получить электромагнитныя волны длиною меньше метра. Впослѣдствіи другими изслѣдователями, примѣнявшими вибраторы очень малыхъ размѣровъ, были получены волны длиною порядка миллиметра. Длины волнъ свѣтовыхъ—порядка тысячной доли миллиметра.

Въ настоящее время электромагнитныя волны нашли себѣ широкое примѣненіе въ *безпроволочной телеграфіи*. Въ этомъ случаѣ сигналы подаются при помощи вибратора въ формѣ *мачты*, практически очень высокой, при чемъ вибраторъ возбуждается періодически въ теченіе болѣе или менѣе длительныхъ промежутковъ времени соотвѣтственно знакамъ, напримѣръ, азбуки Морзе. На нѣкоторомъ разстояніи отъ вибратора-мачты, доходящемъ практически до нѣсколькихъ тысячъ километровъ, располагается вторая мачта, могущая служить пріемникомъ сигналовъ. Мачта-пріемникъ представляетъ собою такую же въ электрическомъ отношеніи систему, какъ и мачта-вибраторъ. Подъ вліяніемъ падающихъ на цѣпь пріемника электромагнитныхъ волнъ въ этой цѣпи возникаютъ электрическія колебанія, которыя и отмѣчаются особыми приборами, реагирующими на эти колебанія. Пріемная цѣпь будетъ тѣмъ чувствительнѣе относиться къ внѣшнему потоку электромагнитныхъ волнъ, чѣмъ ближе періодъ ея собственныхъ колебаній къ періоду этихъ волнъ. Такимъ образомъ, оказывается выгоднымъ настраивать на резонансъ отправительную и пріемную колебательныя цѣпи.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

Электролизъ.

---

92. Общій характеръ явленія. — Прохожденіе электрическаго тока черезъ нѣкоторыя твердыя и жидкія тѣла, называемыя *электролитами*, сопровождается разнаго рода явленіями химическаго характера. Какъ показываетъ ближайшее изученіе этихъ явленій, сущность ихъ заключается въ томъ, что электролиты, представляющіе собою химически сложныя вещества, разлагаются токомъ на составныя части. Самый актъ разложенія называется *электролизомъ*. Терминологія, относящаяся къ этой области, была установлена Фарадэемъ, который далъ и количественныя соотношенія, характеризующія явленіе электролиза. Тѣ проводящія тѣла, черезъ посредство которыхъ токъ вступаетъ въ электролитъ и выходитъ изъ него, незываются *электродами*. Тотъ электродъ, черезъ который токъ входитъ въ электролитъ, называютъ *анодомъ*; электродъ же, черезъ который токъ выходитъ называютъ *катодомъ*. Составныя части, на которыя разлагается токомъ электролитъ, называются *іонами*. Какъ показываетъ опытъ, іоны выдѣляются на электродахъ: на анодѣ такъ называемый *аніонъ*, на катодѣ—*катіонъ*.

Электролитами могутъ быть твердыя тѣла и жидкости. Іодистое серебро можетъ служить примѣромъ твердаго электролита, примѣрами жидкихъ электролитовъ—растворы солей и кислотъ, а также расплавленныя соли.

Выдѣляющіеся во время электролиза водородъ и металлъ всегда оказываются катіонами. т. е. отлагаются на катодѣ. Вообще говоря, явленія электролиза обычно болѣе или менѣе

усложняются благодаря тому, что выдѣляющіеся іоны нерѣдко вступаютъ въ химическое взаимодѣйствіе съ растворителемъ или веществомъ электродовъ. Такимъ образомъ продукты электролиза не всегда оказываются первичными.

Разсмотримъ въ видѣ примѣра электролизъ раствора мѣднаго купороса ($CuSO_4$). Допустимъ при этомъ, что электродами служатъ платиновыя пластинки. При прохожденіи тока на катодѣ будетъ отлагаться мѣдь, а остатокъ SO_4—на анодѣ. Вмѣстѣ съ тѣмъ у анода происходитъ реакція:

$$SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O.$$

Въ результатѣ H_2SO_4 остается въ растворѣ, а кислородъ выдѣляется въ газообразномъ видѣ на поверхности анода.

Если бы анодъ былъ мѣдный, то на его поверхности происходила бы реакція:

$$SO_4 + Cu = CuSO_4,$$

т. е. происходило бы раствореніе анода съ образованіемъ мѣднаго купороса.

Въ видѣ второго примѣра разсмотримъ электролизъ воднаго раствора сѣрной кислоты (H_2SO_4) между платиновыми электродами. На катодѣ выдѣляется H_2, а остатокъ SO_4—на анодѣ. При этомъ, какъ было только что указано, происходитъ у анода реакція, сопровождающаяся образованіемъ вновь частицы H_2SO_4 и выдѣленіемъ O на поверхности анода. Такимъ образомъ, при электролизѣ раствора сѣрной кислоты на катодѣ выдѣляется водородъ, а на анодѣ кислородъ въ такомъ соотношеніи, какъ если бы разлагалась вода; сѣрная же кислота остается въ результатѣ неразложенной. Очень часто описываемый случай электролиза называютъ «электролизомъ воды». Должно однако помнить, что это не совсѣмъ точно и что чистая вода сама по себѣ не только не подвергается электролизу, но даже не проводитъ тока.

93. Законы Фарадэя.—Количество іоновъ, выдѣляемыхъ токомъ при прохожденіи черезъ электролитъ, находится, какъ это слѣдуетъ изъ опытовъ Фарадэя, въ очень простомъ соотношеніи съ количествомъ электричества, протекшаго при этомъ черезъ электролитъ.

Первый законъ Фарадэя состоитъ въ слѣдующемъ:

Количество разложеннаго электролита или количество выдѣлившагося іона прямо-пропорціонально количеству протекшаго черезъ электролитъ электричества.

Такимъ образомъ можемъ написать:

$$p = cq,$$

гдѣ p—количество вещества, q—количество электричества и c—коэффиціентъ пропорціональности, обыкновенно называемый *электрохимическимъ эквивалентомъ*. Ясно, конечно, что *электрохимическій эквивалентъ представляетъ собою количество разложеннаго электролита или выдѣлившагося іона, соотвѣтствующее единицѣ протекшаго черезъ электролитъ количества электричества.*

Такъ какъ при постоянномъ токѣ:

$$q = it,$$

то въ этомъ случаѣ можемъ написать:

$$p = cq = \\ = cit.$$

Второй законъ Фарадэя гласитъ слѣдующее:

Если одно и то же количество электричества протекаетъ черезъ различные электролиты, то количества выдѣленныхъ различныхъ іоновъ пропорціональны ихъ химическимъ эквивалентамъ.

Отсюда заключаемъ, что электрохимическіе эквиваленты должны быть пропорціональны химическимъ эквивалентамъ. Достаточно, слѣдовательно, опредѣлить электрохимическій эквивалентъ какого-либо одного вещества. Величину его для другихъ веществъ можно найти простымъ вычисленіемъ. Элементы, могущіе входить въ различныя соединенія съ различною валентностью, будутъ, очевидно, имѣть различные электрохимическіе эквиваленты сообразно химическимъ эквивалентамъ. Такъ, напримѣръ, мѣдь или желѣзо, образующія соли закиси и окиси, обладаютъ различнымъ электрохимическимъ эквивалентомъ въ зависимости отъ того, выдѣляются ли они изъ растворовъ солей закиси или окиси. Въ нижеслѣдующей таблицѣ приведены электрохимическіе эквиваленты нѣкоторыхъ элементовъ; числа

дают въ миллиграммахъ количество выдѣленнаго элемента при прохожденіи одного кулона электричества.

Водородъ	0,010352
Кислородъ	0,0828
Хлоръ	0,03675
Желѣзо (изъ солей закиси)	0,2898
» (» » окиси)	0,1932
Мѣдь (» » закиси)	0,6562
» (» » окиси)	0,3281
Никкель (» » закиси)	0,3050
» (» » окиси)	0,2033
Серебро	1,1180

Ясно, что одинъ граммъ-эквивалентъ какого бы то ни было іона выдѣляется на электродѣ при прохожденіи черезъ электролитъ нѣкотораго вполнѣ опредѣленнаго количества электричества, которое нетрудно вычислить, зная электрохимическій эквивалентъ даннаго іона. Пользуясь цифрами вышеприведенной таблицы, легко видѣть, что граммъ-эквиваленту любого іона соотвѣтствуетъ:

96540 кулоновъ.

Замѣтимъ еще, что при протеканіи одного кулона черезъ цѣпь выдѣляются объемы газовъ (при 0° и 760 мм. давленія):

водорода	0,116 куб. см.
кислорода	0,058 куб. см.

94. Вольтаметръ. — На основаніи предыдущаго понятно, что мы можемъ измѣрить силу нѣкотораго постояннаго тока, опредѣляя количество іоновъ, имъ выдѣляемыхъ, и зная при этомъ соотвѣтствующій промежутокъ времени и величину электрохимическаго эквивалента. Мы можемъ, такимъ образомъ, разсчитать силу тока по слѣдующей формулѣ:

$$i = \frac{p}{ct}.$$

Электролитическій приборъ, предназначенный для этой цѣли, называется *вольтаметромъ*. Наиболѣе часто примѣняются воль-

таметры, въ которыхъ сила тока опредѣляется или по количеству мѣди, выдѣлившейся изъ раствора мѣднаго купороса, или серебра—изъ раствора азотносеребряной соли, или по объему водорода, выдѣленнаго токомъ изъ подкисленной воды.

95. Конвекціонная теорія электролиза. — Для объясненія явленій электролиза допускаютъ, что каждая молекула вещества, подвергающагося разложенію, нормально состоитъ изъ двухъ частей—іоновъ,—одна изъ которыхъ заряжена положительнымъ электричествомъ, а другая—отрицательнымъ. При этомъ оба заряда равны по абсолютной величинѣ и потому въ обычныхъ условіяхъ молекула кажется нейтральною въ электрическомъ отношеніи. Силы, связывающія отдѣльныя части молекулы, представляютъ собою съ этой точки зрѣнія не что иное, какъ силы взаимодѣйствія разноименно наэлектризованныхъ тѣлъ. Въ нѣкоторыхъ, однако, случаяхъ и, между прочимъ, при раствореніи вещества въ водѣ эти силы настолько ослабляются, что отдѣльныя части молекулы получаютъ нѣкоторую свободу: молекулы, какъ говорятъ, *диссоціируютъ* (Клаузіусъ). Степень диссоціаціи, т. е. отношеніе числа диссоціировавшихъ молекулъ къ числу молекулъ недиссоціировавшихъ, зависитъ опредѣленнымъ образомъ, какъ показалъ Арреніусъ, отъ концентраціи раствора. Если теперь представимъ себѣ, что въ подобный растворъ со свободными іонами, представляющими собою продукты диссоціаціи нейтральныхъ молекулъ, внесены электроды, напримѣръ, металлическія пластины, присоединенныя къ зажимамъ электрическаго генератора, то должно ожидать слѣдующаго. Электрическое поле, образовавшееся при этомъ между пластинами, будетъ дѣйствовать чисто механически на свободные заряженные іоны. Положительные іоны начнутъ двигаться къ отрицательно заряженной пластинѣ, т. е. къ катоду, а отрицательные іоны — къ аноду, гдѣ и выдѣляются. Это движеніе іоновъ въ электролитѣ и представляетъ, повидимому, сущность того процесса, который происходитъ внутри этого проводника при прохожденіи черезъ него тока. Такимъ образомъ, прохожденіе электрическаго тока черезъ электролитъ сопровождается переносомъ заряженныхъ матеріальныхъ частицъ въ направленіи тока (положительные іоны) и въ обратномъ направленіи (отрицательные іоны). Такого рода токъ называется *конвекціоннымъ*.

96. Электродвижущая сила поляризаціи. — Если опустить въ сосудъ съ нѣкоторымъ электролитомъ совершенно тождественные

электроды и, пользуясь ими, пропустить черезъ электролитъ токъ, то весьма часто вслѣдствіе наступающаго явленія электролиза электроды дѣлаются настолько различными, что совокупность ихъ и даннаго электролита можетъ играть роль гальваническаго элемента (§ 46). Про электроды, пришедшіе въ особое состояніе благодаря предварительному пропусканію тока, говорятъ, что они *поляризованы.* Поляризацію электродовъ легко обнаружить, если прекратить пропусканіе тока отъ внѣшняго источника и присоединить къ электродамъ, остающимся въ жидкости, какой либо гальванометръ. Мы тотчасъ же обнаружимъ, что *поляризаціонный элементъ* развиваетъ въ цѣпи токъ, направленіе котораго какъ разъ противоположно направленію первоначальнаго тока. Такимъ образомъ, *поляризаціонная э.-д. сила* обратна по направленію той внѣшней э.-д. силѣ, которая произвела описываемое дѣйствіе.

Разсмотримъ для примѣра случай раствора сѣрной кислоты, въ который опущены двѣ платиновыя пластинка. Пропуская черезъ электролитъ токъ отъ внѣшняго генератора, мы вскорѣ замѣтимъ, что этотъ токъ начинаетъ ослабѣвать. Объясняется это возникновеніемъ обратной э.-д. силы поляризаціи. Изслѣдуя состояніе пластинокъ, мы найдемъ, что поверхность анода покрывается слоемъ кислорода, а поверхность катода—слоемъ водорода. Послѣ того, какъ пластинки разобщены съ внѣшнимъ генераторомъ и соединены между собою проволокой, кислородъ и водородъ по мѣрѣ протеканія тока постепенно съ нихъ исчезаетъ. Послѣднее обстоятельство мы можемъ разсматривать, какъ результатъ обратнаго возсоединенія кислорода съ водородомъ. Этотъ обратный процессъ имѣетъ мѣсто, ибо поляризаціонный токъ выдѣляетъ водородъ на томъ электродѣ, на которомъ раньше сконденсировался кислородъ, и—кислородъ тамъ, гдѣ раньше сконденсировался водородъ.

97. Электрическій аккумуляторъ.—Когда подъ дѣйствіемъ тока отъ внѣшняго генератора возникаетъ въ нѣкоторой системѣ э.-д. сила поляризаціи, мы несомнѣнно имѣемъ дѣло съ запасаніемъ энергіи въ этой системѣ, ибо вновь возникшая э.-д. сила можетъ совершенно самостоятельно генерировать токъ и, слѣдовательно, произвести работу. Въ виду этого принято называть *электрическимъ аккумуляторомъ* систему, состоящую изъ электролита и двухъ опущенныхъ въ него электродовъ и спо-

собную запасать энергію во время *заряженія*, какъ обыкновенно называютъ процессъ поляризованія электродовъ.

Мыслимо большое количество различныхъ электрохимическихъ комбинацій, способныхъ играть роль электрическаго аккумулятора. Практическое значеніе, однако, до настоящаго времени имѣетъ почти исключительно одинъ только *свинцовый аккумуляторъ*. Послѣдній представляетъ собою двѣ свинцовыя пластины, покрытыя слоемъ сѣрнокислаго свинца и погруженныя въ растворъ сѣрной кислоты. Во время заряженія на катодѣ выдѣляется водородъ, а на анодѣ остатокъ сѣрной кислоты. Вмѣстѣ съ тѣмъ происходятъ вторичныя реакціи согласно слѣдующимъ уравненіямъ. На катодѣ:

$$PbSO_4 + H_2 = Pb + H_2SO_4.$$

На анодѣ:

$$PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O = PbO_2 + 2H_2SO_4.$$

Итакъ, анодъ будетъ покрываться перекисью свинца PbO_2, между тѣмъ какъ катодъ будетъ возстанавливаться въ металлическій (губчатый) свинецъ.

Процессъ заряженія аккумулятора можно считать законченнымъ, когда весь сѣрнокислый свинецъ на электродахъ претерпитъ указанное превращеніе. Электродвижущая сила пары изъ перекиси свинца и металлическаго свинца въ разбавленной сѣрной кислотѣ достигаетъ 2,2—2,25 вольта. Эта э.-д. сила мало-по-малу падаетъ во время *разряда* аккумулятора, когда за счетъ запасенной въ немъ химической энергіи возбуждается въ цѣпи электрическій токъ.

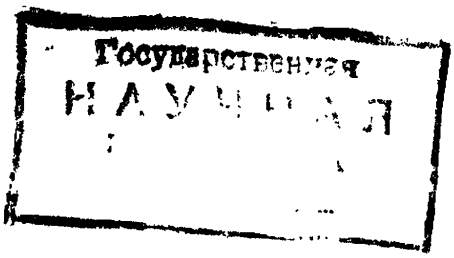
Электролитическій обратный процессъ разряда можно представить себѣ слѣдующимъ образомъ. На анодѣ, который будетъ теперь играть роль положительнаго электрода для внѣшней цѣпи, будетъ выдѣляться водородъ, а на катодѣ остатокъ сѣрной кислоты SO_4. Перекись свинца на анодѣ возстанавливается водородомъ въ окись, а послѣдняя соединяется съ сѣрной кислотой въ сѣрнокислый свинецъ:

$$PbO_2 + H_2 + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2H_2O.$$

Губчатый свинецъ на катодѣ соединяется съ остаткомъ сѣрной кислоты въ сѣрнокислый свинецъ:

$$Pb + SO_4 = PbSO_4.$$

Практически, заряженіе и разрядъ аккумулятора можетъ послѣдовательно повторяться очень большое число разъ.


Государственная

538
М 664

Академик
В. Ф. МИТКЕВИЧ

МАГНИТНЫЙ ПОТОК
И ЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

...ется ...нал.

АКАДЕМИК
В. Ф. МИТКЕВИЧ

МАГНИТНЫЙ ПОТОК И ЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА · 1946 · ЛЕНИНГРАД

1245/26
46
538 ПРОВЕРКА
М. 664 ГНБ 1949

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несколько особенный характер этой книги в значительной степени объясняется моим стремлением возможно ближе придерживаться существа основных установок Фарадея и Максвелла. В полном согласии с общим направлением идей этих ученых мы должны предполагать, что в электромагнитных явлениях особо важную роль играет та их составляющая, которую мы обычно воспринимаем в качестве магнитного поля. В связи с указанным обстоятельством я уделяю в своей книге не мало места доказательствам объективной реальности магнитного потока (Глава I). В основном по этому именно поводу нередко выказывались и, конечно, будут высказываться принципиальные возражения со стороны тех, кто не разделяет проводимых мною фарадее-максвелловских установок.

В этой книге содержится многое, на что не всегда обращается должное внимание, когда речь идет о магнитном потоке, и что не было до сих пор достаточно определенно высказано или не было объединено в какой-либо отдельной монографии. Помимо нового освещения главнейших определений и некоторых закономерностей, относящихся к области магнитных явлений (Главы II и III), читатель встретится здесь с логическим развитием имеющих весьма важное значение мыслей Фарадея и Максвелла по вопросу о процессах, происходящих в магнитном поле. Сказанное, между прочим, относится к Главе IV, где я, исходя из соображений Фарадея о взаимодействии магнитных полей двух сближаемых магнитов, развиваю учение о преобразованиях магнитного потока. Благодаря этому получается возможность несколько углубиться в рассмотрение многих деталей того, что происходит в магнитном поле различных электромагнитных систем и, в частности, ири функционировании электромагнитных генераторов, двигателей и трансформаторов. Глава V в основном посвящена проблеме магнитного экранирования и так называемым униполярным машинам постоянного тока. Наконец, в Главе VI анализируются, с точки зрения Фарадея и Максвелла, общепринятые представления об электрическом токе и делаются попытки по-новому подойти к вопросу о сущности этого электромагнитного явления, в котором особо важную роль играет магнитный поток самоиндукции. Здесь, между прочим, я касаюсь природы элементарных электрических зарядов и на основании результатов, полученных в моих экспериментальных исследованиях, прихожу к выводам, которые на первый взгляд могут показаться совершенно неожиданными. Однако и в данном случае речь идет лишь о развитии общих руководящих установок Фарадея и Максвелла.

В книге нашли свое отражение многие мысли, возникшие у меня за долгие годы работы в области теоретической электротехники, а также собраны воедино мои опубликованные и еще не опубликованные труды,

относящиеся к данной области. Совершенно естественно, конечно, что при этом в книге встречаются некоторые повторения ранее уже сказанного мною, но в общем всё заново переработано, систематизировано и значительно дополнено рядом новых соображений.

Изложение книги рассчитано на читателя, уже знакомого с учением об электрических и магнитных явлениях и с основами теоретической электротехники. Полагаю, что этот мой труд окажется небесполезным, во-первых, для лиц, вообще интересующихся природой электромагнитных явлений, и, во-вторых, для тех электротехников, которым иногда бывает необходимо вникать в рассмотрение не совсем обычных условий работы каких-либо сложных схем, аппаратов и машин, в особенности когда речь идет о новых электромагнитных конструкциях.

Содержание Главы I настоящей книги находится в самой тесной связи с моим сборником „Основные физические воззрения“.[1] В этом сборнике помещены почти все мои статьи, доклады и выступления, главная цель которых состояла в том, чтобы путем рассмотрения некоторых сторон нашего научного мышления подойти к правильным принципиальным установкам в отношении физических явлений вообще. В частности, я стремился в указанном сборнике выявить достаточные основания для утверждения, что магнитный поток представляет собой подлинную физическую реальность. Необходимость всей этой, так сказать, предварительной работы диктовалась следующими соображениями. До настоящего времени всё еще приходится, к сожалению, сталкиваться с физическими воззрениями, которые в значительной степени дисгармонируют с установками Фарадея и Максвелла. Подобного рода воззрения в общем могут быть охарактеризованы как довольно определенно выраженная склонность к признанию какого-то якобы „физического“ смысла в псевдо-физическом представлении о „действии на расстоянии“, а также к отрицанию специфичности магнитных процессов, реально происходящих в пространстве, окружающем магниты и электрические токи. А всё это весьма тормозит надлежащее воспринятие очень плодотворной точки зрения Фарадея и Максвелла и, конечно, должно быть самым решительным образом опровергнуто для обоснования дальнейшего развития руководящих идей этих двух великих ученых, положивших начало физической теории электромагнитного поля.

Feci quod potui, faciant meliora potentes.

В заключение выражаю большую благодарность М. А. Шателену, В. С. Шателен, В. А. Толвинскому, П. Л. Калантарову, Л. Р. Нейману, А. В. Миткевич и Е. С. Лихтенштейну, которые в той или иной форме оказывали мне содействие на разных этапах моих работ, имевших отношение к этой книге.

Считаю долгом с чувством горячей признательности обратиться к светлой памяти моих покойных друзей В. К. Лебединского и М. В. Шулейкина. Они полностью воспринимали общие фарадее-максвелловские установки. Беседы с ними всегда бывали насыщены глубоким содержанием.

За непрестанную помощь в деле осуществления настоящего моего труда особенно благодарю Е. Н. Миткевич.

4 февраля 1944 г.

В. Миткевич

[1] Издательство Академии Наук СССР, 3-е изд., 1939.

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных научно-исследовательских работ Фарадея, относящихся к области электрических и магнитных явлений, совершенно исключительное значение имеет сделанное им в конце 1831 г. открытие электромагнитной индукции тока. Открытие это весьма расширило и углубило теоретические представления, с которыми мы оперируем в данной области физических знаний, и предоставило в распоряжение человечества мощное средство для преобразования механической работы, получаемой за счет неисчерпаемых природных ресурсов, в энергию электрического тока. До настоящего времени во всем мире электрические станции применяют электромагнитные генераторы, основанные на фарадеевском достижении.

В самой непосредственной связи с указанным открытием Фарадея стоят его исследования новых, ранее неизвестных свойств магнитного поля. Он сосредоточил особое внимание на различных проявлениях физической реальности, которую мы теперь называем магнитным потоком. По всей справедливости мы должны считать Фарадея основоположником учения о магнитном потоке.

Настоящая книга главным образом посвящена именно рассмотрению и некоторому развитию идей Фарадея, относящихся к учению о магнитном потоке. Мы полагаем, что весьма назидательно и целесообразно хотя бы вкратце ознакомиться с главнейшими обстоятельствами из жизни этого великого ученого, наложившими своеобразный отпечаток на его физическое мышление и методы его научной работы.

Михаил Фарадей родился 22 сентября 1791 г. в семье бедного лондонского кузнеца. Ограниченность средств не позволила отцу Михаила Фарадея дать ему систематическое образование. Не закончив обучения даже в начальной школе, Михаил с 13 лет должен был поступить учеником в переплетную мастерскую, где овладел этим ремеслом. Он проработал в качестве переплетчика до 22-летнего возраста. Побуждаемый необычайной жаждой знания, молодой Фарадей всё свое свободное время посвящал чтению книг из области естествознания, преимущественно по химии и физике. Обстоятельства до некоторой степени способствовали этому, так как положение переплетчика при книжной лавке предоставляло в его распоряжение много интересных книг. Кроме того, он не упускал случая посещать по окончании дневного труда различные популярные лекции, дававшие ему более или менее систематизированные знания и будившие его пытливую мысль. Так, путем самообразования и упорного непрерывного труда над собою Михаил Фарадей приобрел много ценных знаний. Ремесло переплетчика уже не удовлетворяло молодого ученого-самоучку, стремившегося к дальнейшему росту. В 1813 г. ему удалось, наконец, поступить на должность лабораторного служителя в Королевский Институт, бывший самым выдающимся научно-исследовательским учреждением в Лондоне.

Постоянное общение с крупнейшими учеными того времени и лабораторная обстановка благоприятствовали попыткам Фарадея начать самостоятельные научные исследования. В 1816 г. была напечатана его первая научная работа. Вскоре он обратил на себя всеобщее внимание несколькими достижениями большого значения. В 1821 г. Фарадею удалось осуществить непрерывное превращение электрической энергии в механическую работу. Он добился длительного вращения проводника с током вокруг магнитного полюса и, обратно, вращения магнитного полюса вокруг проводника с током. Это открытие, таившее в себе принципиальную схему простейшего электродвигателя, представляло собой чрезвычайно важный вклад в науку и доставило его автору мировую известность.

В 1824 г., в возрасте 33 лет, Фарадей за свои научные заслуги был избран членом лондонской Академии Наук (Королевского Общества). В 1825 г. он был назначен директором лабораторий Королевского Института, в котором 12 лет назад начал работать в самой скромной должности.

Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции тока, значительно пополнившее ряд изучаемых соотношений между электричеством и магнитизмом, дало большой импульс развитию науки. Во всем мире ученые занялись дальнейшим обследованием электромагнитного поля на основе того, что было получено Фарадеем. Наиболее существенное развитие его научных достижений было выполнено Клерком Максвеллом, гениальным продолжателем трудов Фарадея, полностью воспринявшим его основные физические установки. Максвелл облек в математическую форму многое из его идей. Как известно, сам Фарадей не владел математическим анализом и не пользовался им в своей научной работе. В полном соответствии с идеями Фарадея, Максвелл обобщил закон электромагнитной индукции, распространив его на случай какого угодно контура, независимо от того, проводящий он или не проводящий. По существу, половина максвелловых уравнений электромагнитного поля представляет собой не что иное, как именно дифференциальную форму обобщенного закона электромагнитной индукции. Максвелл своими уравнениями положил начало теории электромагнитного поля и учения об электромагнитных волнах. Вместе с тем он установил электромагнитную природу света. Герц, продолжая работу Максвелла, на опыте воспроизвел электромагнитные волны сравнительно большой длины и показал, что они действительно обладают теми же свойствами, что и световые колебания. Вся современная радиотехника возбудилась к жизни после опытных исследований Герца и явилась одним из многочисленных доказательств правильности основных физических воззрений Фарадея.

В предисловии к „Трактату об электричестве и магнитизме“[1] Максвелл коснулся вопроса об особенностях своего труда, отличающих его от других трудов этого рода, опубликованных главным образом в Германии, и приводит по данному поводу следующие разъяснения:

> „Одна из причин этого состоит в том, что прежде, чем я начал изучать электричество, я принял решение не читать никаких математических сочинений, посвященных данному вопросу, до прочтения фарадеевских „Опытных исследований по электричеству“ (Experimental Researches in Electricity) от начала до конца. Я был осведомлен, что высказывалось мнение о различии между фарадеевским методом понимания явлений и методами математиков, так что ни Фарадей,

[1] James Clark Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism. 1873.

ни математики не были удовлетворены языком друг друга. Я имел также твердую уверенность в том, что это разногласие не является результатом ошибок той или другой стороны. Я получил такую уверенность прежде всего благодаря сэру Вильяму Томсону,[1] советам и помощи, а также опубликованным трудам которого я очень многим обязан из того, что я изучил по этому вопросу.

Когда я стал углубляться в изучение Фарадея, я заметил, что его метод понимания явлений также оказывается математическим, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я нашел также, что этот метод может быть выражен в обычной математической форме и, таким образом, может быть сопоставлен с методами признанных математиков.

Например, Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, проходящие по всему пространству там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел промежуточную среду там, где они ничего не видели, кроме расстояния. Фарадей искал сущность явлений в том, что в действительности происходит в среде, другие удовлетворялись тем, что находили эту сущность в способности действия на расстоянии, которою одарены электрические жидкости.

Когда я перевел то, что я рассматривал как фарадеевские идеи, на математический язык, я нашел, что в общем результаты обоих методов совпадают, так что одни и те же явления учитываются обоими этими методами, и они приводят к одним и тем же законам действия...

Я нашел также, что некоторые из наиболее плодотворных методов исследования, открытых математиками, могут быть много лучше выражены в терминах, вытекающих из идей Фарадея, чем в их оригинальной форме".

В связи с приведенными словами Максвелла необходимо подчеркнуть, что формально-математический метод оперирует с внешним эффектом, обнаруживаемым в явлении, в фарадеевском же методе главным объектом внимания служит внутренняя обстановка, при наличии которой и благодаря которой возникает рассматриваемое явление. Ясно поэтому, что метод Фарадея должен приводить исследователя к более тесному контакту с тем, что в действительности происходит в природе.

Стремясь углубиться в понимание сущности физических явлений, Фарадей чутко прислушивался к голосу опыта, практики. Он шел совершенно самостоятельным путем, часто вразрез с общепринятыми установками, имевшими в большинстве случаев чисто формальный характер.

Необычайная плодотворность научных достижений Фарадея теснейшим образом связана именно с его правильным подходом к пониманию физических явлений. Этот гениальный сын кузнеца выковал четкие представления об общем характере процессов, происходящих в области электричества и магнитизма, и, в частности, о природе открытого им явления электромагнитной индукции тока. Подобный характер научного творчества Фарадея необходимо рассматривать в качестве одной из главнейших причин того, что данное открытие оказалось способным немедленно же породить целый ряд практических применений, из которых на первом месте стоят электромагнитные генераторы тока. Трудно и даже совершенно невозможно представить себе в настоящее время теорию и расчет разли-

[1] „Я пользуюсь настоящим случаем для выражения моей признательности сэру В. Томсону и профессору Тэту за многие ценные советы, поданные ими во время печатания этой работы".

чных электромагнитных механизмов, не основанные на фарадеевском методе физической трактовки процессов, происходящих в этих механизмах.

Электротехники всего мира высоко чтут имя Михаила Фарадея, так как вся современная электроэнергетика развилась на базе его научных работ.

В 70-х годах прошлого столетия Максвелл следующими замечательными словами охарактеризовал значение открытия электромагнитной индукции:

„Всё величие и оригинальность фарадеевского достижения могут быть оценены путем рассмотрения последующей истории этого открытия. Как и следовало ожидать, оно немедленно сделалось предметом исследований со стороны всего ученого мира, но некоторые из наиболее опытных физиков оказались неспособными избежать ошибок в формулировке изучаемого явления, полагая при этом, что они применяют более научный язык, чем язык Фарадея. До настоящего времени математики, которые отвергли фарадеевский метод формулировки его закона как не соответствующий точности их науки, никогда не были в состоянии установить какое-либо существенно отличающееся соотношение для полного выражения содержания явлений без того, чтобы не вводить гипотез относительно взаимодействия вещей, физически не существующих, подобно, например, элементам токов, которые вытекают из ничего, затем текут по проводнику и, наконец, опять входят в ничто.

После почти полувековой работы этого рода мы можем сказать, что, хотя практические приложения фарадеевского открытия возросли и продолжают каждый год возрастать в отношении их численности и ценности, ни одного исключения из формулировки этих законов, данной Фарадеем, не было открыто, ни одного нового закона не было добавлено к ним, и фарадеевская оригинальная формулировка остается по сей день единственной, которая выражает не более того, что может быть установлено экспериментом, и единственной, при помощи которой теория явления может быть представлена так, чтобы она была точна и количественно правильна, оставаясь в то же время в рамках простых методов изложения“.[1]

Эти строки были написаны около 70 лет тому назад и вместе с тем, однако, содержание их производит такое впечатление, как будто бы они написаны теперь, в наши дни. Трудно себе представить более меткую и более острую характеристику того разрыва между указанными Фарадеем путями физического мышления и формально-математическими методами рассмотрения физических явлений, — разрыва, который, к сожалению, до сих пор еще имеет место и даже достиг в последнее время своего апогея. В связи с этим необходимо констатировать, что многое из фарадеевских высказываний, относящихся к области физических процессов, еще недостаточно оценено. Его „Опытные исследования по электричеству“ продолжают оставаться арабской книгой за семью печатями для тех, кто вследствие чрезмерного увлечения формальными методами исследования утратил в большей или меньшей степени способность понимать изложенное простыми словами. Всякая же истина, если она действительно есть истина, может и должна найти свое выражение в простых словах.

Фарадей дал нам лучший образец того, чем должна быть физическая мысль. Он был физик-мыслитель в самом высоком значении этого слова.

---

[1] Encyclopaedia Britannica.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МАГНИТНЫЙ ПОТОК КАК ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

§ 1. Общая характеристика магнитного поля

а. Из числа разнообразных проявлений магнитного поля, известных в настоящее время, механическое воздействие этого поля на расположенные в нем магнитные полюсы раньше всего привлекло к себе внимание со стороны естествоиспытателей. В течение очень длительного периода указанное свойство магнитного поля было главным объектом всестороннего изучения и обследования. Этим именно и объясняется то обстоятельство, что все основные определения и понятия, относящиеся к магнитному полю, носят на себе более или менее явный отпечаток представлений, возникших в связи с механическими проявлениями магнитного поля.

Опыт показывает, что магнитное поле наблюдается в пространстве, окружающем естественные и искусственные магниты. При этом полюсы магнитов механически взаимодействуют между собою. Мы знаем, что разноименные полюсы притягивают, а одноименные отталкивают друг друга. Под влиянием земного магнитного поля, связанного с земным шаром, который представляет собою как бы естественный магнит космического масштаба, небольшая магнитная стрелка, сделанная легко подвижной, стремится расположиться в плоскости магнитного меридиана, т. е. приблизительно в направлении с юга на север. На этом основано устройство магнитных компасов, изобретенных еще в глубокой древности и представляющих собой первое практическое приложение свойств магнитного поля.

Кулон сформулировал основной закон механического взаимодействия магнитных полюсов, установив зависимость силы указанного взаимодействия от расстояния между полюсами и от количества гипотетических магнитных масс (количества магнитизма), сосредоточенного в каждом из полюсов. Этим было положено начало математической теории магнитного поля, получившей большое развитие благодаря последующим трудам ряда крупнейших ученых (Гаусс, Вебер, Кельвин и др.).

После того как Эрстед обнаружил отклонение магнитной стрелки электрическим током, значительно расширилась область представлений о магнитном поле и его источниках. Началось всестороннее изучение магнитного поля, связанного с проводником, по которому течет электрический ток. Трудами Ампера, Био и Савара, Лапласа и других ученых был выяснен общий характер магнитного поля тока и был выражен в математической форме закон механического взаимодействия электрического тока и магнитных полюсов, а также закон механического взаимодействия двух электрических токов друг с другом. Вместе с тем была высказана гипотеза о том, что всякий магнит состоит из большого

количества элементарных токов, надлежащим образом ориентированных, и что магнитное поле так называемых постоянных магнитов по существу тождественно с магнитным полем электрических токов. Эта гипотеза всё более и более подтверждалась последующими исследованиями, и в настоящее время можно считать окончательно установленным, что магнитное поле всегда и безусловно всегда сопутствуется электрическим током и, обратно, не существует в природе такого электрического тока, который не сопровождался бы соответствующим магнитным полем, органически связанным с данным током. Значение этого научного достижения чрезвычайно велико.

Электромагнитная индукция, открытая Фарадеем, представляла собою существенно новое проявление свойств магнитного поля. Существенно новым здесь было то обстоятельство, что указанное явление совершенно не имеет характера чисто механических действий. Это открытие послужило мощным стимулом к развитию наших знаний, касающихся взаимных соотношений между магнитными и электрическими процессами, и дало повод для пересмотра ряда привычных взглядов на сущность этих процессов.

6. На всем протяжении до-фарадеевского периода физическая мысль, обращавшаяся к вопросу о сущности электрических и магнитных взаимодействий, почти исключительно оперировала с представлением об actio in distans, т. е. о действии на расстоянии. Согласно этой точке зрения, взаимодействие различных физических объектов может быть рассматриваемо как результат присущей данным объектам способности оказывать влияние друг на друга сквозь пустое пространство, на расстоянии.

Основная идея, руководившая Фарадеем во всех его работах и составлявшая, так сказать, неизменный фон его научного мышления, заключалась в том, что все взаимодействия, наблюдаемые в природе вообще, а следовательно, и взаимодействия электрического и магнитного характера, могут осуществляться не иначе, как при непременном участии той среды, которая находится между взаимодействующими телами и окружает их. Мысль об этом постоянно привлекала к себе внимание Фарадея. Питая глубокую антипатию к идее действия на расстоянии, он рассматривал всякого рода притяжения и отталкивания как проявления особого состояния среды. По Фарадею, подобное действие одного физического объекта на другой передается, вообще говоря, по кривым путям, которые он назвал *„силовыми линиями“* и которые в его окончательном представлении рисуются не как отвлеченные математические линии, а как „физические силовые линии“, т. е. как нитевидные элементы поля, существующие в действительности и распределенные соответствующим образом по всему пространству, занимаемому физическим полем. С рассматриваемой точки зрения, притяжения и отталкивания, а также другие явления, наблюдаемые в поле, должны быть объясняемы особенными свойствами указанных нитевидных элементов поля.

Фарадей неоднократно возвращался к вопросу о реальном существовании „силовых линий“. Особенно много внимания он считал необходимым уделять *„физическим силовым линиям“* магнитного поля. Количество и густота распределения силовых магнитных линий имеют, согласно представлениям Фарадея, большое значение как обстоятельство, от которого зависит интенсивность всего того, что происходит в магнитном поле, а следовательно, и интенсивность явления электромагнитной индукции. „Физические силовые линии“ ведут себя, по Фарадею, как упругие нити. Они стремятся сократиться и взаимно отталкиваются, будучи расположены параллельно в одном и том же направлении. Они полярны,

т. е. обладают неодинаковыми свойствами по противоположным направлениям.

В своих заключительных работах „О физическом характере линий магнитной силы" и „О физических линиях магнитной силы" Фарадей вновь подвергает весьма обстоятельному анализу все известные ему опытные данные и окончательно утверждается в мысли, что „силовые линии", которые мы можем себе представить в магнитном поле, обладают всеми признаками каких-то физических индивидуумов. В п. 3297 первой работы Фарадей совершенно определенно ставит вопрос в следующих словах: „Что касается важного вопроса, подлежащего рассмотрению, то он заключается только в том, имеют ли линии магнитной силы *физическое существование* или нет". (Курсив принадлежит самому Фарадею.) В конце второй работы он дает ответ на поставленный вопрос и говорит, между прочим: „Итак, все эти факты и многие другие указывают на существование физических силовых линий в пространстве, окружающем магнит, так же, как и внутри него".

В связи со всем вышеизложенным мы, стремясь возможно ближе держаться общих воззрений Фарадея, будем представлять себе магнитное поле как пространство, в котором соответствующим образом распределены „физические силовые линии", в дальнейшем нами называемые просто *магнитными линиями*, во избежание некоторых недоразумений, могущих в настоящее время возникнуть (см. §§ 9 и 11 Главы II).

Совокупность магнитных линий принято называть *магнитным потоком*. Таким образом, мы можем сказать, что *магнитное поле есть пространство, заполненнное магнитным потоком.*

в. Фарадей неоднократно подвергал разностороннему анализу всю совокупность известных ему и в значительной степени добытых им самим данных, относящихся к основным свойствам электромагнитных процессов. Как известно, этот великий естествоиспытатель обладал столь же проникновенной интуицией, сколь был глубок и плодотворен его метод анализирования физических явлений. И вот, в конце концов, он был склонен думать, что из двух сторон, на которые обычно раздельно устремляется внимание изучающего область электромагнитизма и которые мы воспринимаем или как чисто электрическую сторону, или как чисто магнитную сторону некоторого электромагнитного комплекса, — из этих двух сторон основную и, так сказать, первенствующую роль играют процессы, рассматриваемые нами в качестве магнитных. Таково общее впечатление, производимое всей совокупностью высказываний Фарадея, которые относятся к заключительному периоду его научной деятельности.

г. Необходимо со всей определенностью констатировать, что общие идеи Фарадея, касающиеся магнитного поля, еще не получили должного признания со стороны физической науки. До сих пор иногда продолжают трактовать магнитный поток в качестве некоторой фикции, т. е. в качестве вспомогательного понятия, быть может, и полезного при рассмотрении ряда явлений, в магнитном поле наблюдаемых, но якобы не соответствующего их действительной природе. По этой именно причине главная цель, которую преследовал автор при написании Главы I (§§ 1—5), состояла в том, чтобы возможно убедительнее доказать объективную реальность магнитного потока и вскрыть принципиальную ошибочность противоположной точки зрения. Вообще в этой книге автор стремился выяснить, что основные фарадеевские представления о структуре магнитного потока в достаточной степени соответствуют его вероятной природе.

§ 2. О „физическом" действии на расстоянии

а. Представление о действии на расстоянии необходимо рассматривать в качестве одного из наиболее ярких примеров того, что можно назвать *объективированием математических абстракций.* Дело в том, что понятия и образы, возникающие на математической почве и оказывающиеся весьма полезными и ценными в процессе математического анализа, нередко трактуются затем как некоторые объекты, существующие в действительности, или как неотъемлемые свойства, присущие реальным объектам. Упускается иногда из вида и то исключительно важное обстоятельство, что изучение некоторой физической проблемы в ряде случаев допускает использование разнообразных методов математического анализа, каждый из которых требует введения своих особых вспомогательных понятий, удобных при формальном описании явления но во многих случаях не имеющих прямого отношения к тому, что происходит на самом деле. История науки показывает, что бывало немало примеров, когда чисто условные представления становились привычными и на этой почве с течением времени возникало неправильное объективирование этих условных представлений. Их начинали рассматривать в качестве чего-то, непосредственно вскрывающего сущность изучаемых явлений природы.

Так именно и случилось с представлением о действии на расстоянии применительно к области магнитных и электрических явлений. Это представление настолько глубоко внедрилось в науку об указанных явлениях, что его стали трактовать в качестве „физического" действия на расстоянии, т. е. в качестве подлинной причины притяжений и отталкиваний, наблюдаемых в магнитных и электрических полях. Только благодаря трудам Фарадея, который указал на важную роль промежуточной среды в процессе всякого рода взаимодействий, начала в достаточной степени обнаруживаться несостоятельность идеи о „физическом" действии на расстоянии.

Фарадей совершенно не допускал возможности базироваться на точке зрения действия на расстоянии при изучении и объяснении каких бы то ни было явлений природы. В своих рассуждениях он неоднократно ссылался на авторитет Ньютона. Между прочим, Фарадей, перечисляя обстоятельства, могущие служить обоснованием его взглядов,[1] указывает и следующее:

> „5. Твердое убеждение, выраженное сэром Исааком Ньютоном, что даже тяготение не может осуществляться в виде производимого на расстоянии эффекта иначе, как через посредство какого-то промежуточного агента,[2] выполняющего условия некоторой физической силовой линии".

Как известно, представление о действии на расстоянии, рассматриваемом в качестве первичного физического явления, возникло в связи с работами Ньютона, который дал математическую формулировку открытого им закона всемирного тяготения. Сам Ньютон совершенно неповинен в приписываемом ему некоторыми учеными введении в науку идеи о „физическом" действии на расстоянии. Он ясно понимал, что область применения представлений, казалось бы, диктуемых законом всемирного тяготения, ограничивается рамками чисто математи-

---

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, § 3305.

[2] Здесь Фарадей в особом примечании полностью приводит цитату из переписки Ньютона с Бентлеем (см. эту именно цитату несколькими строками дальше).

ческого анализа явлений тяготения и ни в коем случае не должна быть распространяема на вопросы, касающиеся самой сущности тяготения. Великий математик, показавший весьма совершенные образцы надлежащего использования формулированного им закона и тем положивший основание всей небесной механики, Ньютон, будучи одновременно и великим физиком, вполне отчетливо и достаточно категорически высказывал свое мнение о природе тяготения. По этому поводу он писал (в третьем письме к Бентлею):

„Что тяготение должно быть врожденным, присущим и важнейшим свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через *пустоту* без участия чего-то иного, при посредстве чего и через что их действие и сила могут передаваться от одного к другому, это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-нибудь, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, непрерывно действующим согласно известным законам; но представляет ли собою этот агент что-либо материальное или нематериальное, это я предоставляю усмотрению моих читателей".[1]

В развитии математической теории магнитных и электрических полей роль закона Ньютона сыграли всем известные законы Кулона, относящиеся к магнитным и электрическим взаимодействиям и по форме своей очень напоминающие ньютоновский закон тяготения. На почве законов Кулона и их применений создались представления, которые мало-помалу начали внедряться в наше физическое мышление, вообще говоря, без достаточных оснований. В области учения о магнитных явлениях стало широко использоваться понятие магнитных масс или количеств магнитизма, которое было введено в науку Кулоном в качестве вспомогательного понятия, удобного при математическом описании механических взаимодействий магнитных полюсов. Фиктивность магнитных масс вскрылась благодаря исследованиям Фарадея и в настоящее время может считаться окончательно установленной. В какой мере осторожно подходил Кулон к чисто условному понятию магнитных масс, явствует

[1] В последнее время, в особенности после опубликования в 1937 г. записей Д. Грегори о его беседах с Ньютоном, делаются попытки обесценить ссылку Фарадея на приведенную цитату из письма к Бентлею указаниями на то, что Ньютон, осуждая идею действия на расстоянии, якобы имел в виду только такой агент, который выходит за пределы категории физических реальностей. Однако подобные попытки не трудно опровергнуть. Во-первых, не подлежит сомнению, что Ньютон во всяком случае считал абсурдной самую мысль о возможности механического взаимодействия тяготеющих масс без участия „чего-то иного" (anything else), обладающего способностью служить посредником при передаче именно этих сил *механического* взаимодействия. Во-вторых, особенно существенно, что абсурдности идеи действия на расстоянии Ньютон противопоставлял необходимость признания промежуточного агента *совершенно независимо* от того, будет ли он материальным (по старой терминологии), или нематериальным. Следовательно, по „усмотрению... читателей" можно мыслить этот агент материальным, а в настоящее время, конечно, и должно именно так мыслить, т. е. признавать промежуточную среду. В-третьих, в настоящее время *не имеют значения* возможные конкретные представления самого Ньютона о каком-либо „нематериальном" агенте, быть может, отражавшие эпоху, когда он жил (около 300 лет тому назад). Это к существу дела не относится. Из всего сказанного вытекает, что Фарадей вполне законно и правильно ссылался на авторитет Ньютона для обоснования своих мыслей об участии промежуточной среды в магнитных и электрических взаимодействиях. Попытки же доказать противное свидетельствуют лишь о склонности отрицать промежуточную среду и о каком-то недопонимании общего характера физических установок Ньютона, этого великого основоположника точных наук о природе.

из следующего. В одном из своих мемуаров, посвященных магнитизму,[1] он говорит:

„Из этих экспериментов следует, что, какова бы ни была причина магнитных явлений, все эти явления могли бы быть истолкованы и подвергнуты анализу при посредстве допущения, что в стальных пластинках или в их молекулах находятся две магнитные жидкости, причем частицы каждой такой жидкости взаимно отталкиваются пропорционально их плотности и обратно пропорционально квадрату их расстояния и притягивают частицы другой жидкости в том же отношении..."

В связи с изложенным выше полезно напомнить весьма категорическое суждение О. Д. Хвольсона, который в своем „Курсе физики"[2] говорит:

„Термином actio in distans, т. е. действие на расстоянии, обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие..."

Таким образом, мы имеем достаточные основания, перефразируя вышеприведенные слова Ньютона, сказать следующее: физик, углубляющийся в вопрос о природе изучаемых им явлений, не может себе представить, чтобы некоторый физический объект вступал во взаимодействие магнитного или электрического характера с другим физическим объектом через абсолютную пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их взаимодействие осуществлялось бы.

Необходимо, однако, отметить необычайную стойкость псевдофизической идеи о действии на расстоянии. Как уже отмечалось выше, до самого последнего времени иногда продолжают еще рассматривать действие на расстоянии как нечто, вполне отвечающее природе вещей, т. е. как первичное физическое явление. И это наблюдается несмотря на глубокое физическое содержание всех трудов Фарадея, Максвелла, Герца и многих других ученых. Единственное объяснение подобного положения дела можно искать в чрезмерном влиянии на наше физическое мышление методов математического анализа. Широкое и плодотворное использование высшего анализа при изучении физических явлений, необычайная утонченность и, так сказать, изящество многих математических методов естественно приводят к тому, что ученые, работающие в области физики и, вообще говоря, весьма совершенно владеющие всем аппаратом высшего анализа, до известной степени непроизвольно объективируют формы и образы, являющиеся чистыми математическими абстракциями. Форма выдвигается на первый план, заслоняя собою содержание. В этом отношении мы имеем дело с чем-то, аналогичным наблюдаемому в литературе и в области изобразительных искусств, где время от времени возникают течения, ставящие форму выше содержания.

6. Ввиду того, что идея о „физическом" действии на расстоянии имеет еще своих защитников и в ряде случаев нет достаточной четкости в общих установках, касающихся явлений природы, целесообразно остановиться несколько подробнее на внутреннем содержании этой псевдо-физической идеи. Это тем более необходимо сделать, что выявить достаточно убедительно объективную реальность магнитного потока можно, только доказав полную абсурдность самой мысли о „физическом" действии на расстоянии.

---

[1] Coulomb. Collections de Mém. relatifs à la Physique. 3, p. 321.
[2] О. Д. Хвольсон. Курс физики, т. I, стр. 181, 1923.

Будем вести наши рассуждения именно применительно к области магнитных взаимодействий. Представим себе два магнита N_1S_1 и N_2S_2 (рис. 1), расположенных на некотором совершенно произвольном расстоянии один от другого в так называемой „пустоте". Допустим далее, что магнит N_1S_1 окружен со всех сторон двумя замкнутыми поверхностями A и B, нигде не соприкасающимися между собой и не пересекающимися. Зададим теперь такой вопрос:

Могут ли магниты N_1S_1 и N_2S_2 взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом в слое между двумя поверхностями A и B не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Если мы действительно стремимся вникнуть в сущность физических явлений, происходящих в магнитном поле, то мы и можем и должны дать на этот вопрос вполне определенный ответ „да" или „нет". Совершенно невозможно допустить мыслимость некоторого третьего ответа. Не может быть также и речи о каком-либо синтезе этих принципиально противоположных и исключающих друг друга ответов „да" и „нет", так как нельзя представить себе построение такой физической теории, согласно которой в слое между поверхностями A и B в одно и то же время и происходил бы некоторый физический процесс, и решительно ничего не происходило бы.

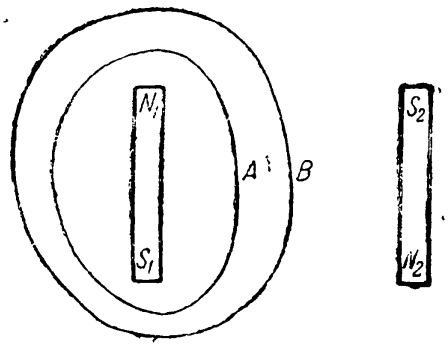


Рис. 1.

Автор настоящей книги сформулировал подобный вопрос в связи с дискуссией о природе явлений, происходящих в электромагнитном поле, и неоднократно его предлагал приверженцам точки зрения „физического" действия на расстоянии.[1] Опыт показывает, что обычно весьма затруднительно получить со стороны лиц, привыкших к формально-математическим методам анализа физических явлений, какой-либо определенный ответ на указанный вопрос. В огромном большинстве случаев никакого четкого ответа не дается, а вместо этого иногда делаются попытки возражать против правильности и закономерности постановки такого вопроса. Однако возражения этого рода не трудно опровергнуть.

Действительно, как бы мы ни смотрели на сущность происходящих в природе процессов, все мы принимаем за нечто безусловно достоверное тот факт, что магниты N_1S_1 и N_2S_2 могут как-то физически взаимодействовать. Нельзя, далее, представить себе какие-либо доводы против утверждения, что в слое, ограниченном поверхностями A и B (рис. 1), либо может, вообще говоря, происходить какой бы то ни было физический процесс, либо он может совершенно отсутствовать. Что-либо третье, кроме этих возможностей, немыслимо, как было указано выше. В связи с этим мы имеем полное основание сопоставлять факт взаимодействия магнитов N_1S_1 и N_2S_2 с вероятностью наличия или с вероятностью отсутствия какого бы то ни было физического процесса в слое между поверхностями A и B и иметь по этому поводу суждение. Таким образом, вышеприведенный вопрос, побуждающий нас взвесить вероятность того или другого, необходимо признать вполне допустимым, законным и правильным.[2]

[1] Миткевич. Основные физические воззрения, Изд. 3-е, Изд. Акад. Наук СССР, 1939.

[2] Для иллюстрации того, насколько далеко заходит иногда непонимание сущности фарадее-максвелловской точки зрения, отвергающей „физическое" действие на расстоянии,

С фарадеевской точки зрения, к которой полностью присоединился и Максвелл, на заданный вопрос необходимо, конечно, ответить „нет". И этот ответ представляется совершенно естественным и единственно приемлемым.

Ответ „да" логически вытекает из точки зрения „физического" действия на расстоянии. Абсурдность и противоестественность такого ответа столь очевидна, что противники фарадее-максвелловских общих установок, повидимому, именно по этой причине в огромном большинстве случаев воздерживаются от четкого ответа „да" или просто не дают никакого ответа. Но всякое уклонение от прямого ответа на рассматриваемый вопрос, всякие оговорки или имеющие характер таковых оговорок рассуждения по существу эквивалентны ответу „да". Какое бы то ни было оправдание подобного ответа представляется аналогичным утверждению, что два лица, одно из которых находится внутри запертой комнаты, а другое где-либо снаружи, могут переговариваться друг с другом даже в том случае, если все стенки комнаты абсолютно непроницаемы для звука или любой иной формы передачи разговорных сигналов. Мысль о возможности подобного рода сношений в полной мере нелепа.

в. Обращаясь теперь к внутреннему содержанию ответов „нет" и „да" на сформулированный выше вопрос, необходимо прежде всего иметь в виду, что свойства, обнаруживаемые в каком бы то ни было физическом явлении, мыслимы только в непосредственной связи с соответствующим носителем этих свойств, т. е. в связи с некоторой физической реальностью. Далее, всякая физическая реальность или сколь угодно малая часть ее обязательно занимает присущий ей объем нашего трехмерного пространства. Наконец, мы никак не можем представить себе пространственной разобщенности самой физической реальности и ее характерных свойств. Нельзя допустить, чтобы физическая реальность была расположена в одном месте, а ее свойства сами по себе, в оторванном виде, локализировались бы где-либо в другом месте. И то и другое мы должны мыслить объединенным в одном и том же объеме.

Рассмотрим теперь магнит N_1S_1, наличие которого обусловливает возникновение механического воздействия на полюсы магнита N_2S_2, расположенного, вообще говоря, где угодно. Пока магнита N_1S_1 нет, полюсы магнита N_2S_2 такого механического воздействия не испытывают. В связи с этим мы можем утверждать, что в каждой точке пространства вокруг магнита N_1S_1, т. е. в каждой точке поля магнита N_1S_1, обнаруживаются какие-то физические свойства, именно способность действовать механически на полюсы магнита N_2S_2.

можно указать что, вместо четкого ответа на сформулированный выше вопрос, делались между прочим, попытки трактовать данный вопрос в качестве чего-то, совершенно бессодержательного и не имеющего никакого смысла. Так, например, проводилась аналогия между этим вопросом и вопросом о „цвете меридиана". Автор настоящей книги признал долю истины в этом, по существу, поверхностном сравнении. Именно, если под „меридианом" метафорически подразумевать некоторую характеристику нашей общей позиции, то вопрос о „цвете меридиана" действительно можно сопоставить с вопросом о наших принципиальных физических установках, которые, опять же в метафорическом смысле, всегда бывают „окрашены" в тот или иной „цвет". А „цвет" этот может либо соответствовать правильному миропониманию, либо же характеризовать ложные физические воззрения. Таким образом, сформулированный автором вопрос является своего рода „лакмусовой бумажкой", которая обладает свойством выявлять наши принципиальные установки в отношении существа физических взаимодействий, совершающихся в природе (см. стр. 202 „Сборника", указанного в предыдущем примечании).

По поводу рассматриваемых свойств поля магнита N_1S_1 могут быть сделаны два предположения.[1]

Предположение первое. Эти характерные свойства возникают в некотором отдельном участке пространства только вследствие появления там полюсов магнита N_2S_2.

Предположение второе. Эти свойства, обусловленные наличием магнита N_1S_1, как-то были уже распределены во всем окружающем данный магнит пространстве совершенно независимо от появления полюсов магнита N_2S_2, роль которых в таком случае сводится лишь к обнаружению указанных свойств.

Первое предположение представляется в высокой степени неправдоподобным и противоречащим всей совокупности того, что мы знаем о магнитных и электрических полях вообще. В этом отношении можно, например, указать на следующее. В любой точке пространства, окружающего магнит N_1S_1, свойство воздействовать на полюсы магнита N_2S_2 возникает лишь через некоторый промежуток времени, считая от момента появления магнита N_1S_1, т. е. с каким-то запозданием. Однако в случае предварительного установления поля магнита N_1S_1, данное свойство поля мгновенно обнаруживается при появлении полюсов магнита N_2S_2. На основании этого мы заключаем, что рассматриваемое свойство приобретается всеми участками пространства, окружающего магнит N_1S_1, благодаря какому-то предварительному процессу еще до внесения полюсов магнита N_2S_2.

Остается, следовательно, только второе предположение, а именно, что специфические свойства пространства, как-то закономерно ориентированные вокруг магнита N_1S_1, имеют место совершенно независимо от наличия магнита N_2S_2.

Принимая во внимание сказанное раньше о непосредственной связи свойств с их носителем, мы должны признать, что те или иные характерные свойства данного магнитного поля присущи какому-то реальному носителю этих свойств, т. е. физической реальности, заполняющей каждый объемный участок пространства, где обнаруживаются свойства магнитного поля. Эту физическую реальность, распределенную по всему пространству и способную приходить в специфическое состояние, характерное для магнитного поля, мы не можем мыслить иначе, как в форме некоторой материальной среды.

Таким образом, мы имеем логическое обоснование принципиальной фарадее-максвелловской установки, согласно которой все физические взаимодействия совершаются при непременном участии среды, окружающей взаимодействующие центры. Отсюда же совершенно естественно вытекает и ответ „нет" на сформулированный вопрос.

г. Противоположная точка зрения, признающая возможность „физического" действия на расстоянии и в связи с этим приводящая к ответу „да" на рассматриваемый вопрос, отвергает все вышеприведенные обоснования фарадее-максвелловской установки и допускает реальное существование абсолютно пустого пространства, решительно ничем не заполненного. Последнее допущение является главным моментом во всех рассуждениях с точки зрения действия на расстоянии, тогда как идея о пространстве абсолютно пустом, самом по себе, без заполняющей его какой-либо материальной среды в самом широком значении этого слова, есть лишь один из примеров объективирования математической

[1] Необходимо указать, что весь ход мыслей, изложенных ниже, позаимствован у Фарадея, и, по существу, почти ничего нового к этому не добавлено. См. Faraday, Experimental Researches in Electricity, vol. III, pp. 571, 572.

абстракции и не имеет прямого отношения к реальному миру физических явлений. Об этом будет еще речь в следующих параграфах. Итак, первый основной упрек по адресу точки зрения действия на расстоянии состоит в том, что она вводит в круг физического мышления чистую фикцию — абсолютно пустое пространство.

Допустим, однако, на время, что абсолютно пустое пространство может реально существовать и что оно разделяет два взаимодействующих магнита N_1S_1 и N_2S_2 (рис. 1), занимая весь объем слоя между поверхностями A и B. Ясно, что в таком случае данный слой не содержит в себе никакой физической реальности, и поэтому мы должны считать его совершенно, так сказать, запрещенным для какого бы то ни было физического процесса, способного осуществлять связь между взаимодействующими магнитами N_1S_1 и N_2S_2, и именно связь в пределах нашего трехмерного пространства. Иными словами, при данных условиях мы не можем мыслить какой-либо проходящей через этот слой линии физической связи между полюсом магнита N_1S_1 и полюсом магнита N_2S_2. Если, однако, эти магниты всё же взаимодействуют, т. е. если между ними всё-таки проявляется некоторая физическая связь, то очевидно, что она должна осуществляться как-то помимо замкнутого запрещенного слоя, ограниченного поверхностями A и B. Но это значит, что линия связи между магнитами N_1S_1 и N_2S_2 выходит из пределов трехмерного пространства и пролегает где-то в пространстве с бо́льшим, чем три, числом измерений, например в четырехмерном пространстве.

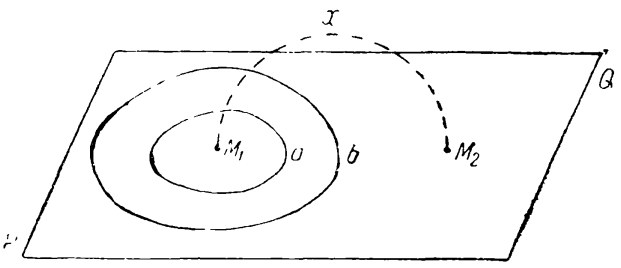


Рис. 2.

Для пояснения сказанного воспользуемся аналогией, прибегнув к пространствам с пониженным числом измерений. Рассмотрим какое-нибудь двухмерное пространство, скажем, поверхность PQ (рис. 2.) Пусть точки M_1 и M_2 символизируют наши взаимодействующие системы. Окружим далее точку M_1 двумя замкнутыми кривыми a и b, лежащими на поверхности PQ, нигде не касающимися одна другой и не пересекающимися. В таком случае всякая линия геометрической связи между точками M_1 и M_2, лежащая в пределах двухмерного пространства PQ, обязательно должна пройти через зону, ограниченную замкнутыми линиями a и b. Но если эта зона запрещена для геометрической связи между точками M_1 и M_2, то искомая связь может быть осуществлена только помимо запрещенной зоны, а именно при помощи какой-либо линии x, соединяющей точки M_1 и M_2 вне рассматриваемого двухмерного пространства PQ, т. е. через трехмерное пространство, как это показано на рис. 2 пунктирной линией.

Совершенно аналогичным образом и в случае взаимодействия магнитов N_1S_1 и N_2S_2 (рис. 1), если весь объем слоя, ограниченного поверхностями A и B, запрещен для какой-либо физической связи данных магнитов, а эту физическую связь мы всегда ассоциируем с некоторой линией геометрической связи между ними, — то эту последнюю мы вынуждены искать за пределами нашего трехмерного пространства.

Защитники точки зрения „физического“ действия на расстоянии могут, конечно, указывать, что связь физического взаимодействия магнитов N_1S_1 и N_2S_2 не нужно обязательно ассоциировать с какой-либо линией геометрической связи между ними. Однако, какая бы то ни

было связь между магнитами N_1S_1 и N_2S_2 не может иметь места при условии их абсолютной изолированности. Благодаря наличию запрещенного слоя между поверхностями A и B, который совершенно разделяет наше трехмерное пространство на две разобщенные части, магниты N_1S_1 и N_2S_2 оказываются расположенными в двух абсолютно изолированных одна от другой областях трехмерного пространства. Для того, чтобы эти магниты всё же могли быть связаны взаимодействием, они так или иначе должны быть объединены в одной и той же пространственной непрерывности. Формально можно допустить, что две отдельные трехмерные пространственные непрерывности охватываются одною общей четырехмерной пространственной непрерывностью, т. е. четырехмерным пространством. Это именно и констатируется возможностью построения линии геометрической связи между магнитами N_1S_1 и N_2S_2 сквозь незапрещенное четырехмерное пространство.

До настоящего времени физика не занималась явлениями, якобы происходящими в четырехмерном пространстве, вне нормального трехмерного пространства. Всё это увело бы нас в совершенно чуждую фантастическую область. Герц, за которым нельзя не признать глубокого проникновения в сущность явлений природы, в своей речи, произнесенной в Гейдельберге (1889), на тему „О соотношениях между светом и электричеством“ коснулся попыток физического объяснения электрических явлений при помощи действия на расстоянии и при этом указал, что таким путем мы привносим в науку элементы чего-то, имеющего спиритический характер. Действительно, многие теоретики спиритизма и между ними некоторые выдающиеся ученые, привыкшие верить в реальность спиритических, медиумических и прочих сверхъестественных явлений, пытались в давно минувшее время научно обосновать свое отношение к ним и при этом обычно базировали свои суждения именно на допущении физической связи между явлениями, протекающими в нашем трехмерном пространстве, через посредство охватывающего его четырехмерного пространства. Однако совершенно несомненно, что спиритические и т. п. явления вполне объясняются сознательным, а иногда даже подсознательным введением участников сеансов в заблуждение и всё это обычно весьма осложняется наличием массового гипноза или самогипноза. Одним словом, четырехмерное пространство тут совершенно не при чем. Дело обстоит гораздо проще, и нет решительно никаких оснований привлекать к ответственности четырехмерное пространство. Тем меньше оснований прибегать к четырехмерному пространству в случае рассмотрения вопроса о природе физических явлений.

Сказанное выше нисколько не опровергает правильности и целесообразности использования идеи о многомерных пространствах в процессе математических операций, к которым иногда весьма полезно и даже необходимо прибегать в некоторых специальных отделах современной теоретической физики. В области приложений высшего анализа не может быть никаких ограничений для формально безупречного оперирования с математическими абстракциями. Но в области нашего физического мышления, в особенности при рассмотрении вопроса о вероятной природе физических явлений, несомненно приходится считаться с некоторыми ограничениями, вытекающими из наших общих принципиальных установок, и не выходить за пределы нашей нормальной пространственно-временной непрерывности, в которой эти явления имеют место.

д. Итак, *всесторонний анализ точки зрения „физического“ действия на расстоянии приводит к выводу о полной несостоятель-*

ности этой точки зрения при рассмотрении природы физических явлений. Следовательно, вопрос, касающийся общих условий взаимодействия двух магнитов N_1S_1 и N_2S_2 (рис. 1), категорически решается в пользу фарадее-максвелловской принципиальной установки, признающей основную роль промежуточной среды, при участии которой и через посредство которой в данном случае осуществляется физическая связь между полюсами магнитов. Вместе с тем необходимо утверждать, что в объеме слоя, ограниченного поверхностями A и B, а также и во всем пространстве, окружающем магниты, происходит реальный физический процесс и промежуточная среда действительно находится в каком-то особом состоянии, воспринимаемом нами как специфические свойства магнитного поля или, иными словами, магнитного потока. Таким образом, *магнитный поток мы должны признать подлинной физической реальностью, а не чем-то воображаемым.*

Опыт и в особенности электротехническая практика, предоставляющая возможность работать с разного рода электромагнитными механизмами, убеждает нас в том, что реальность магнитного потока столь же несомненна, как и реальность, например, электрона или радиоволн. Названные физические реальности подобно магнитному потоку недоступны непосредственному восприятию нашими органами чувств, но действительное существование их вполне надежно устанавливается целым рядом косвенных методов.

е. В некоторых случаях при решении задач из области физики довольствуются формально правильным рассмотрением того или иного вопроса с точки зрения действия на расстоянии. Отсюда и проистекают попытки оспаривать представление о промежуточной среде, которое иногда совсем не используется в самом процессе чисто математических выводов. Всё это вполне понятно и до известной степени извинительно, в особенности если отсутствует склонность физически мыслить. Однако подобного рода попытки вторгаться в область физических представлений с идеей действия на расстоянии, являющейся физическим абсурдом, не выдерживают никакой критики.

В связи со всем, сказанным выше, может возникнуть мысль, не правильнее ли было бы совершенно изгнать, хотя бы из нашего научного языка, такие привычные понятия, как „притяжение“ и „отталкивание“ в виду их явного несоответствия подлинной причине наблюдаемых явлений. Не должны ли мы постараться так строить нашу речь, чтобы вполне обходиться без этих несомненно фиктивных понятий? Однако подобное ригорическое преследование какого бы то ни было использования понятий „притяжение“ и „отталкивание“ надо признать нецелесообразным, так как эти понятия всё же позволяют нам весьма просто и кратко описывать явления, когда *всё происходит так, как будто бы тела притягиваются или отталкиваются* (здесь мы используем известный оборот речи, примененный Ньютоном в отношении всемирного тяготения). Надо только никогда не забывать о чистой условности соответствующих выражений, допустимых в такой же степени, как и выражение „солнце всходит и заходит“ или выражение „лодка притягивается к борту идущего корабля“. В последнем примере мы имеем в виду всем известное явление кажущегося притяжения лодки к борту корабля в случае, если этот корабль движется вперед, а лодка привязана достаточно длинным канатом к борту корабля или даже к концу какой-либо балки, вынесенной с носа поперек корабля на несколько метров в сторону от борта. На самом деле, конечно, лодка отнюдь не „притягивается“ корабельным бортом, который вовсе не

обладает столь интенсивным и поистине магическим свойством. Суть же дела в том, что лодка, увлекаемая кораблем и движущаяся по поверхности воды вместе с ним, испытывает не одинаковые давления воды с обеих сторон и, именно, меньшее давление со стороны промежутка между лодкой и кораблем и большее давление с внешней стороны. Поэтому-то лодка и прижимается к борту идущего корабля, а нам кажется, что борт „притягивает" лодку, и мы обычно так и описываем это на первый взгляд непонятное явление. Точно так же и кажущиеся „притяжения" разноименных магнитных полюсов и взаимные „отталкивания" одноименных полюсов представляют собою лишь результат специфических процессов, происходящих в материальной среде, заполняющей пространство, в котором наблюдаются проявления магнитного поля.

§ 3. Магнитный поток как форма движущейся материи

а. Во всех без исключения физических явлениях мы встречаемся с движущейся материей. Как показывает история естествознания, это основное положение всегда и везде служило надежной путеводной нитью, приводящей к правильному пониманию того, что происходит в действительности. Наука о природе, идущая по указанному пути и рассматривающая все явления как взаимно связанные в процессе непрерывных и разнообразных изменений, по мере своего развития углубляет знание закономерностей, которые характеризуют мироздание в целом, и последовательно приближает нас ко всё более и более полному проникновению в сущность движущейся материи.

Что такое материя? С общефилософской точки зрения, понятие материи обозначает всё то, что объективно реально существует и что мы познаем или непосредственно через наши ощущения, или же посредством всякого рода дополнительных приспособлений, расширяющих границы использования наших органов внешних чувств.

Опыт показывает, что вещи и предметы, с которыми мы имеем дело при изучении природы, не могут быть устранены из обстановки физического эксперимента какими бы то ни было усилиями нашего сознания. Таким образом, эти вещи и предметы не являются продуктом нашей психической деятельности, но они существуют вне нашего сознания и совершенно независимо от нашего сознания.

Представление о материи охватывает собой не только так называемую гравитационную материю, из которой состоят обычные тела разного рода и которую мы называем веществом, но и вообще всё, что лежит в основе каких бы то ни было иных реальных объектов (например, магнитного потока, электрического поля, квантов лучистой энергии и т. д.). В связи с прогрессом науки о природе наши конкретные представления о различных видах материи, изучаемой в физическом эксперименте, т. е. о материи в чисто физическом смысле, претерпевают эволюцию, изменяются и дополняются.

Бесконечное разнообразие форм, в которых проявляется материя, во всех без исключения случаях характеризуется тем, что она всегда претерпевает те или иные изменения, явные или скрытые, т. е. всегда находится в состоянии движения. При этом понятие *движения* мы обобщаем, охватывая им всевозможные изменения и процессы, происходящие в природе. Пространственные перемещения небесных тел, механическое движение небольших масс на отдельных мировых телах, тепловое движение молекул, химическое разложение и соединение, пространственные

перемещения мельчайших материальных частиц, входящих в состав атома, электрический ток и вообще электромагнитные явления, биологические процессы и т. д. и т. п.—всё это примеры различных форм движения, в одной из которых или в нескольких одновременно участвует любая элементарная частица материи в каждый данный момент.

Никогда и нигде материя не находится в абсолютном покое. Материя пребывает в вечном движении и именно благодаря этому состоянию движения материя обладает активностью, вследствие которой она способна воздействовать на наши органы чувств и обусловливать наши ощущения. Через посредство ощущений и только таким путем вещи и тела природы, а также свойственные им закономерности находят свое отражение в нашем сознании.

Понятия материи и движения настолько тесно связаны между собой, что необходимо всегда их мыслить совместно. *Движущаяся материя есть нечто единое.* Наши обычные и столь всем привычные представления о „материи" и „движении" в отдельности характеризуют собою способ сосредоточения внимания на каждой из двух, по существу нераздельных сторонах единой объективной реальности, которую мы называем „движущейся материей".

Таким образом, если мы очень часто говорим только о материи или только о движении, то надо при этом никогда не упускать из вида, что это есть лишь своего рода абстрагирование при всестороннем рассмотрении процессов, происходящих в природе. Материя может быть только движущаяся. Движение может происходить только там, где есть то, что движется, т. е. где есть материя.

6. В процессе анализа разнообразных проявлений движущейся материи и всевозможных видов движения материи мы совершенно не в состоянии отрешиться от представлений о пространстве и времени. Эти представления служат основным фоном всякого рассмотрения явлений природы. Подобно тому как мы не можем никакими усилиями нашего сознания устранить вещи и предметы внешнего мира из обстановки любого физического эксперимента, точно так же никоим образом мы не можем мыслить эти вещи и предметы вне пространства и времени. Поскольку движущаяся материя есть объективная реальность, постольку пространство и время являются объективно реальными основными формами существования вечно движущейся материи.

Представление о пространстве выработалось в сознании человека в результате многотысячелетнего опыта и всестороннего ознакомления с основными свойствами вещей и предметов внешнего мира. Среди этих основных свойств, общих для всех тел природы, весьма важное значение имеет их протяженность по всем доступным наблюдению направлениям. Отсюда возникло представление об объемности тел природы и вообще всякой физической реальности, так или иначе проявляющей себя при изучении человеком разнообразных процессов, которые происходят в природе. Практика показывает, что любая физическая реальность в отношении ее протяженности характеризуется тем, что в пределах данной реальности всегда можно построить три и только три взаимно перпендикулярных направления. Так создалось и оформилось представление о трехмерной пространственной протяженности всех тел природы и о трехмерном пространстве как объективно реальной форме их существования. Итак, при рассмотрении физических явлений мы всегда должны иметь в виду *трехмерное пространство,* которое в этом смысле мы можем называть *физическим пространством.*

Остановимся теперь на вопросе о так называемой абсолютной

пустоте. Представление об абсолютно пустом пространстве до последнего времени нередко продолжает засорять физическое мышление и является одним из примеров ошибочных уклонов при изучении явлений природы. Пространство вообще не есть нечто самодовлеющее, не есть какое-то самостоятельно существующее вместилище вещей и предметов внешнего мира. *Будучи лишь объективно реальной формой существования разнообразных вещей и предметов, пространство немыслимо без заполняющей его вечно движущейся материи.*

Совершенно абсурдны встречающиеся иногда попытки допущения хотя бы беспредельно малых объемов пространства, в которых не содержится ничего материального. Ведь абсолютная пустота, т. е. пространство, в котором абсолютно отсутствует что бы то ни было, есть подлинное „ничто" в физическом смысле. Ведь это есть абстрагированная форма существования реальных объектов, рассматриваемая без этих объектов. Мысль о том, будто подобное „ничто" может реально существовать само по себе, является бессодержательной нелепостью. В природе нет места тому, что не обладает признаками объективно реального физического содержания. Следовательно, нигде нет областей пространства, которые можно было бы рассматривать в качестве абсолютной пустоты. В связи с этим необходимо утверждать, что *материя непрерывно заполняет всё физическое пространство.*

Данное утверждение отнюдь не противоречит тому факту, что движущаяся материя может проявляться в виде дискретных элементарных частиц и в виде разного рода комплексов этих частиц, каковые комплексы мы обычно называем телами. Утверждение о непрерывности материи надо понимать в том смысле, что всё наше трехмерное пространство без какого бы то ни было изъятия заполнено материальной средой. При этом наблюдаемые в природе прерывности, воспринимаемые нами в виде дискретных материальных частиц (атомы вещества, составные части атомов и т. д.), являются специфическими формами движущейся материи, находящимися в единстве с материальной непрерывностью.

Итак, представление об абсолютно пустом пространстве должно быть со всею решительностью изгнано из нашего физического мышления как не соответствующее тому, что может быть в действительности.

в. Простейшей формой движения является пространственное перемещение материи, обычно называемое нами механическим движением — в случаях перемещения различных тел природы, которые обладают некоторой определенной массой. В связи с тем, что в настоящее время физическая наука доказала изменчивость массы тела в зависимости от его скорости и эта характеристика материи, казавшаяся раньше абсолютно постоянной, уже утратила подобное значение, представление о механическом движении настоятельно требует пересмотра, в особенности в виду затруднительности его применения в ряде предельных случаев, когда явления выходят из границ приложения классических законов механики. Термин „пространственное перемещение" является более общим, так как он охватывает собою не только обычное механическое движение, но и всевозможные иные случаи простейших движений материи.

Здесь необходимо еще раз указать следующее. Пользуясь общим понятием пространства в научном языке и в нашей обычной речи, мы весьма часто допускаем абстрагирование данного понятия и в силу привычки всё еще рассуждаем так, как будто бы эта основная форма существования материи представляет собою нечто самостоятельное. Так, например, мы говорим о каком-либо объеме пространства, в котором

размещены те или иные тела как в некотором вместилище. Разного рода физические процессы и происходящие при этом движения мы рассматриваем на фоне данного объема пространства как некоторой арены, существующей будто бы совершенно самостоятельно. Вообще мы привыкли говорить, что материя движется в пространстве и т. д. и т. п. Если всё это делается с учетом того, что пространство есть лишь форма существования материи и в действительности совершенно не отделимо от нее, если такие обороты речи мы сознательно применяем лишь как удобный условный язык, — в этом нет ничего недопустимого. Быть может, правильнее было бы говорить, что физические реальности, существующие в природе, при своем движении непрерывно изменяют места соприкосновения с другими физическими реальностями, их непосредственно окружающими. Но это слишком сложный и практически неудобный способ описания процессов движения, а потому целесообразно пользоваться обычными более лаконичными оборотами речи.

г. Достойно особого внимания следующее обстоятельство, проливающее свет на основную роль пространственных перемещений материи в разнообразных явлениях природы. Все главнейшие успехи современной физики по существу теснейшим образом связаны именно с выяснением тех движений, тех пространственных перемещений материи, которые происходят в различных процессах или в различных физических комплексах, воспринимавшихся ранее в качестве чего-то, не делимого и не разложимого на составные части. Так, например, атом обычного вещества предстал теперь перед взором исследователя как целый микрокосмос, как сложное образование, части которого непрерывно совершают соответствующие пространственные перемещения. Эти составные части атома (электроны, протоны и т. д.), казавшиеся еще недавно какими-то предельными физическими реальностями, благодаря открытию диффракции материальных лучей и успехам теоретической физики в настоящее время представляются в свою очередь в виде каких-то сложных материальных систем, обладающих в основном электромагнитными свойствами и имеющими волновую природу. И, конечно, подлинно реальной причиной диффракции электронов могут быть только процессы волнового характера, которые происходят в материальной среде, совершенно заполняющей трехмерное физическое пространство, и имеют непосредственное отношение к природе электронов и т. п. Вместе с тем несомненно, что эти волновые процессы в конечном итоге должны быть как-то связаны с элементарными пространственными перемещениями материальной среды, которые неизменно входят в состав электронов, протонов и других частей атома. Дальнейшие успехи физической науки, конечно, дадут много материала для выяснения и изучения характера указанных пространственных перемещений.

Вообще, совершенно невозможно представить какой бы то ни было физический процесс или какое бы то ни было состояние материи, которые не заключали бы в себе простейшей формы движения, т. е. пространственных перемещений материи. Ведь если бы могло существовать такое состояние материи, при наличии которого все без исключения объемные элементы материи не претерпевали бы никаких пространственных перемещений, то это означало бы полное отсутствие всякого процесса, всяких изменений в рассматриваемом участке пространства, так как никакие изменения невозможны там, где всё абсолютно неподвижно, где всё в абсолютном покое. Самая мысль о чем-либо подобном весьма неправдоподобна. Этого никогда не бывает в природе, в основе которой лежит вечно движущаяся материя.

д. Таким образом, как бы ни была высока и своеобразна форма движения, она обязательно заключает в себе и простейшую форму движения, т. е. пространственные перемещения материи, отдельные составляющие которых являются, так сказать, кирпичиками, в совокупности образующими сложную конструкцию, воспринимаемую нами в качестве какой-либо объективной реальности со всеми ее специфическими свойствами. Помимо явных движений каждое физическое явление непременно содержит в себе те или иные скрытые пространственные перемещения материи. Стремление познать эти скрытые движения вполне правильно и даже безусловно необходимо при изучении всех физических явлений. Какая-либо попытка мыслить разного рода процессы и различные состояния материи, наблюдаемые в природе, вне теснейшей их связи со скрытой формой движения, т. е. независимо от свойственных им, по самой сущности вещей, элементарных пространственных перемещений материи, должна быть квалифицирована как проявление ошибочных уклонов в мировоззрении.

Во избежание некоторых недоразумений, которые могут возникнуть в связи с изложенными выше соображениями и дать повод к неправильным умозаключениям, необходимо еще обратить внимание на следующее. Задача изучения того или иного физического явления, того или иного состояния материи — ни в коем случае не ограничивается, как это может показаться на первый взгляд, познанием пространственных перемещений материи, входящих в состав данного явления или связанных с данным состоянием материи. *Это есть лишь первая и обязательная задача науки.* Остается еще большая научно-исследовательская работа по изучению специфических особенностей и новых качественных характеристик обследуемого физического явления или какого-либо состояния материи. Здесь говорится о *новых* качественных характеристиках в том смысле, что они не могут быть рассматриваемы в качестве простой суммы некоторых свойств, принадлежащих элементарным процессам, присущим рассматриваемому физическому явлению или состоянию материи. В частности, сказанное в полной мере относится к пространственным перемещениям материи, входящим в состав всякого физического явления и всякого состояния материи. Отличительные особенности этих явлений и состояний материи ни в коем случае не могут быть истолкованы как простая сумма элементарных свойств простейших движений, входящих в их состав. Вообще всегда необходимо считаться с тем принципиально важным обстоятельством, что любая совокупность каких-либо составляющих объектов, сверх отдельных свойств, которые иногда можно рассматривать в качестве простой суммы исходных аддитивных свойств (например, объемов, масс и т. п.), непременно обладает еще новыми свойствами, характерными только для данной совокупности.

Итак, на основании всего сказанного выше мы должны рассматривать любую физическую реальность как некоторую форму движущейся материи, обязательно включающую в себя пространственные перемещения материи. *Следовательно, та физическая реальность, рассмотрению которой посвящена настоящая книга, т. е. магнитный поток, есть особая форма движущейся материи. При этом необходимо утверждать, что в структуру магнитного потока входят и какие-то специфические пространственные перемещения материи.*

е. Признание непременного участия пространственных перемещений материи в составе всех без исключения физических процессов имеет чрезвычайно важное значение для углубленного понимания этих процессов и во всяком случае должно служить руководящей точкой зрения при

построении какой бы то ни было физической теории, касающейся их природы. Игнорирование этого обстоятельства противоречит сущности правильного миропонимания и является главной причиной ряда ошибочных уклонов в физическом мышлении. Как показывает история науки, необоснованность подобных уклонов последовательно и неуклонно вскрывается. Достаточно вспомнить эволюцию учения о теплоте, перипетии многолетней борьбы против идеи о сплошности обычного вещества (борьбы, закончившейся победой атомистической теории), а также развитие современного учения о строении атомов, опровергшего идею об их неразрушимости и обнаруживающего всё новые и новые подробности в структуре вещества.

Наиболее доступная непосредственному наблюдению форма пространственного перемещения материи есть так называемое механическое движение, т. е. перемещение обычной гравитационной материи. С движением этого рода мы встречаемся во всех случаях, относящихся к области механики, теоретической и прикладной, а также в таких физических явлениях, как генерация и распространение звука, тепловое состояние вещества, вихревые образования в газах и в жидкостях и т. п. Но в случаях, например, магнитного потока, электрического поля и вообще электромагнитных процессов мы имеем дело с какими-то еще мало изученными пространственными перемещениями материи особого рода, о которой можно пока сказать только то, что по своим свойствам она весьма существенно отличается от обычного вещества.

§ 4. Эфир

а. Переходим теперь к рассмотрению проблемы, которая имеет исключительно важное значение при построении системы общих физических представлений, в возможно большей степени соответствующих тому, что в действительности происходит в природе. Как было уже разъяснено выше (§ 3), представление об абсолютно пустом пространстве есть абстракция, не имеющая непосредственного отношения к реальному миру физических явлений. Вместе с тем необходимо принять во внимание, между прочим, следующее весьма существенное обстоятельство. Современные технические средства позволяют достигнуть в некотором замкнутом сосуде, например в стеклянном, высочайшей степени вакуума, т. е. освободить этот сосуд практически от всех следов обычного вещества. И тем не менее пространство внутри такого сосуда оказывается не лишенным способности служить своего рода ареной, на фоне которой могут происходить различные физические явления. Именно, в рассматриваемом пространстве совершенно так же, как и в воздухе, могут существовать магнитный поток, электрическое поле и вообще электромагнитное поле; сквозь подобный эвакуированный сосуд свободно распространяется свет и поле тяготения. Непосредственный опыт показывает, таким образом, что пространство, кажущееся совершенно пустым, на самом деле таковым не является и, очевидно, заполнено какой-то особой материальной субстанцией, повидимому отличающейся от обычного вещества. На основании всего сказанного выше (§ 3), ясно, конечно, что объемные элементы этой особой материальной субстанции должны обладать способностью претерпевать пространственные перемещения, без обязательного наличия которых немыслимо какое бы то ни было физическое явление.

Идея об объективно реальном существовании особой материальной среды, сплошь заполняющей всё мировое пространство и играющей

основную роль во всех явлениях природы, уже давно возникла в науке. В этом отношении решающее значение имели исследования в области электромагнитных процессов и стремление вскрыть их сущность. На языке старых эпох, уже пережитых наукой о природе, указанная особая материальная среда называется „эфиром". В связи с тем, что все многочисленные попытки познать эфир путем рассмотрения его предполагаемых свойств по аналогии с известными свойствами обычной гравитационной материи (упругость, атомная структура и т. п.) потерпели крах, современная физика начала весьма отрицательно относиться к самой идее об эфире. Однако совершенно необходимо считаться с тем, что представление об объективно реальном существовании абсолютно пустого пространства есть величайший абсурд. Поэтому за неимением нового, быть может, более подходящего термина, сохраним старый термин *эфир* для общего обозначения материального содержания того, что мы условно продолжаем называть „пустым" пространством.

В настоящее время мы еще не располагаем достаточными данными для построения физической теории эфира. В этом отношении наибольшие затруднения возникают при рассмотрении вопроса о непрерывности эфира, который во всяком случае необходимо трактовать в качестве какой-то материальной среды, заполняющей абсолютно все сколь угодно малые объемные участки нашего трехмерного пространства. Говоря об эфире как о некоторой универсальной физической реальности, мы должны, конечно, понимать это в том смысле, что на данном этапе науки о природе представление об эфире является известным пределом конкретизации наших представлений о материи вообще.

5. В числе инициаторов весьма отрицательного отношения современной физической науки к представлению об эфире несомненно надо считать Эйнштейна, который в начальный период создания своей теории относительности резко осудил Фарадея за то, что он не был в состоянии понять якобы реальный смысл идеи „физического" действия на расстоянии. Однако впоследствии Эйнштейн вернулся было к идее об эфире, но при этом допустил существенную ошибку отвергая мысль о возможности каких-либо пространственных перемещений объемных элементов эфира и полагая, будто бы могут существовать такие физические явления, которые не включают в себе специфических пространственных перемещений материи. В последнее время Эйнштейн снова отказывается от признания эфира как материальной среды, непрерывно заполняющей физическое пространство. Ссылаясь на квантовую теорию, он считает важным достижением физической науки то обстоятельство, что в наших общих представлениях о природе на первый план встала прерывность, дискретность вместо непрерывности. И в этом отношении Эйнштейн стоит на ложном пути, так как в нашем миропонимании должно отражаться внутреннее единство таких двух противоположностей, как непрерывность и прерывность, причем эти противоположности в действительности сосуществуют в природе. Непрерывность необходимо усматривать в том, что всё мировое пространство безусловно сплошь заполнено движущейся материей, которую на данном этапе науки, как было уже указано, мы конкретизируем, помимо гравитационной материи, в форме представления об эфире как об особой материальной среде, не оставляющей абсолютно пустыми никаких сколь угодно малых объемных участков нашего трехмерного пространства. Прерывностями являются всевозможные тела и предметы, наблюдаемые в природе, а также составляющие их элементарные частицы материи (молекулы, атомы, электроны, протоны и т. д.). Современная физическая наука всё более и более отчетливо вскрывает

электромагнитный характер этих мельчайших частиц гравитационной материи, каждая из которых, таким образом, может быть мыслима как недостаточно еще изученный комплекс электромагнитных процессов, происходящих в эфире и, само собой разумеется, заключающих в себе какие-то специфические движения, т. е. пространственные перемещения частиц эфира. В таком случае общая картина всего мироздания представляется в форме синтеза непрерывности (эфира) и прерывностей, являющихся более или менее сложными совокупностями элементарных электромагнитных процессов, — совокупностями, которые мы воспринимаем в форме разнообразных микро- и макрообъектов природы, обладающих свойствами обычной гравитационной материи.

Как один из мотивов отрицательного отношения к идее о мировом эфире выдвигается, между прочим, то обстоятельство, что, если бы эфир в действительности существовал, он должен был бы оказывать сопротивление движению обычных материальных тел, в том числе планет и иных небесных тел. По этому поводу можно сказать следующее. Утверждение, что эфир должен оказывать сопротивление движению доступных непосредственному наблюдению тел природы, содержит в себе в скрытом виде второе утверждение, а именно что мировой эфир, если он существует, должен обладать внутренним трением или вязкостью, т. е. способностью рассеивать энергию движущихся в нем тел и в первую очередь энергию, связанную с пространственными перемещениями самого эфира. Однако это второе утверждение необходимо еще доказать. Недавно было открыто, что жидкий гелий при весьма низкой температуре приобретает новые свойства, становясь сверхподвижной жидкостью, т. е. жидкостью, не обладающей вязкостью, по крайней мере практически. Таким образом, даже известное уже нам жидкое тело может приходить в такое состояние, что его вязкость делается беспредельно малой. Почему же мы должны представлять себе свойства эфира по аналогии с обычными вязкими жидкостями, а не допустить, что в отношении вязкости эфир в значительной степени аналогичен переохлажденному жидкому гелию и на самом деле совершенно лишен вязкости? Ведь еще Гельмгольц при рассмотрении вихревых движений исходил из представления об „идеальной“ жидкости, абсолютно не обладающей вязкостью.

В связи со всем сказанным следует полагать, что *при разработке физической теории эфира он должен рассматриваться в качестве материальной среды, обладающей свойством непрерывности и лишенной какой бы то ни было вязкости.* Остается совершенно открытым вопрос о возможной структурной неоднородности эфира.

Мы здесь не останавливались особо на поводах к возражениям против идеи об эфире, вытекающих из отрицательного результата известных опытов Майкельсона. Ограничимся только указанием на следующее. Не исключена возможность того, что эфир до некоторой степени увлекается огромной массой земли, сопровождаемой далеко простирающимся земным магнитным полем и земным же полем тяготения. С другой стороны, еще весьма неясно, в какой мере фотоны должны вообще увлекаться возможным движением эфира,[1] который во всяком случае необ-

[1] В этом отношении, быть может, представляют известный интерес опыты, произведенные Лоджем (см. Lodge, Philosophical Transactions of the R. S. за 1897 г.) и повторенные в несколько измененном виде мною в 1920—1922 гг. С целью решения вопроса о том, увлекается ли эфир движущимся магнитным полем, Лодж применил интерферометр с четырьмя зеркалами, расположенными в вершинах горизонтального квадрата. Вдоль сторон этого квадрата направлялись пучки света прямой и встречный. Эти пучки света проходили сквозь магнитное поле, образуемое между полюсами электро-

ходимо рассматривать в качестве какой-то „идеальной" жидкости, совершенно не обладающей вязкостью, о чем мы только что говорили. Эти соображения приводят к новому освещению вопроса об интерпретации отрицательного результата опытов Майкельсона.

в. Стремление как-либо обойти самый вопрос об эфире при рассмотрении электромагнитных явлений приводит в ряде случаев к утверждениям, которые скрывают в себе, по существу, ошибочные принципиальные установки, но могут на первый взгляд показаться соответствующими правильному миропониманию.

Иногда, вполне соглашаясь с тем, что магнитные и электрические поля представляют собой подлинные объективные реальности, пытаются трактовать сами эти поля в качестве материи особого рода. Применительно к данным полям основное представление о движущейся материи формально сводят к пространственным перемещениям этих полей в качестве некоторых простейших физических реальностей, так что как будто бы сам собою отпадает вопрос о структуре магнитных и электрических полей и о наличии в составе их каких бы то ни было элементарных пространственных перемещений материи. При этом случается, что на вопрос, какое именно движение материи необходимо иметь в виду при рассмотрении, например, магнитного потока, ограничиваются ответом, что здесь речь должна итти об общем космическом движении Земли или иных небесных тел, в котором во всяком случае принимают участие разного рода объективные реальности, в том числе и рассматриваемый магнитный поток. Примитивно наивный характер такого истолкования природы магнитного потока как некоторой формы движущейся материи — самоочевиден.

Вообще, по поводу указанных попыток ошибочной трактовки электромагнитных явлений можно выдвинуть следующие соображения. Во-первых, природа неисчерпаема, и подобно тому как электроны, протоны и прочие элементарные составляющие обычного вещества не являются предельными объектами изучения природы, о структуре которых якобы уже нельзя ставить вопроса, — точно так же дело обстоит и в отношении магнитного и электрического полей. Остается открытым и вполне правомерным вопрос о том, какие элементарные пространственные перемещения материи (и какой именно материи) неизменно входят в состав физических процессов, воспринимаемых нами как магнитные и электрические поля. Во-вторых, наблюдаемое на опыте превращение энергии

магнита особой формы, который весьма быстро вращался вокруг вертикальной оси, проходившей через точку пересечения диагоналей квадрата. Предполагалось, что увлечение эфира магнитным полем должно проявиться в виде смещения интерференционных полос. Лодж не обнаружил предполагаемого эффекта. В виду того, что вопрос об увлечении магнитного поля электромагнитом, вращающимся вокруг своей оси симметрии, представляется спорным (см. § 17 Главы III), я повторил опыт Лоджа, применив вместо этого электромагнита мощный поток электромагнитной энергии, который направлялся вдоль пучков света в четырехзеркальном же интерферометре, подобном применявшемуся Лоджем. Этот поток электромагнитной энергии создавался при помощи пары плоских проводов, параллельных пучкам света. По проводам передавалась энергия электрического тока. Сквозь узкую щель между этими проводами и проходили пучки света, прямой и встречный. Полученный мною результат был также отрицательный. Я не добился ожидаемого смещения интерференционных полос, хотя оно должно было бы отчетливо наблюдаться, если бы даже скорость света изменялась под влиянием потока электромагнитной энергии лишь на величину порядка $\pm 10^3$ см/сек. Естественно возникает вопрос, объясняется ли отрицательный результат опытов Лоджа и моих тем, что фотоны не увлекаются возможным движением эфира, совершенно лишенного какой бы то ни было вязкости, или же тем, что поток электромагнитной энергии не увлекает эфира, наличие которого мы должны признавать на основании соображений, развиваемых в настоящей Главе I. *В. Миткевич*

магнитного поля в энергию электрического поля и обратно, сопровождаемое взаимным преобразованием данных полей одного в другое (например, в случае колебательных процессов в цепях с емкостью и самоиндукцией), неопровержимо свидетельствует о том, что каждое из этих полей не представляет собою какого-либо самостоятельного вида материи, но что магнитные и электрические поля являются лишь различными специфическими формами движения единой материальной сущности. В-третьих, в ряде случаев мы на опыте имеем дело с постоянными магнитными и электрическими полями, которые приходится признать неизменными и неподвижными в макроскопическом смысле. В частности, это можно констатировать в отношении магнитного потока, пронизывающего, скажем, кубический сантиметр пространства, в котором магнитное поле создается неподвижным постоянным магнитом. Однако мы должны утверждать, что в объеме рассматриваемого кубического сантиметра, хотя бы находящегося в „пустоте", происходят какие-то специфические пространственные перемещения материи, своим характером обусловливающие качественные особенности наблюдаемого поля.

Отрицание эфира иногда сводится к утверждению, что пространство само материально и что, например, электромагнитное поле есть лишь свойство этого „материального пространства". Здесь допускаются две ошибки. Во-первых, концепция материи подменяется концепцией пространства, которое на самом деле представляет собою лишь объективно реальную форму существования материи. Во-вторых, подменяя концепцию материи концепцией пространства, мы приходим к необходимости рассматривать движение „материального пространства" и между прочим должны говорить о пространственных перемещениях объемных элементов пространства, так как, повторяем, всякое движение вообще, всякое состояние материального объекта обязательно включает в себе и пространственные перемещения материи. Но совершенно очевидно, что мысль о пространственных перемещениях объемных элементов пространства представляет собой нечто абсурдное и во всяком случае не имеющее решительно никакого отношения к области физических явлений. Речь может итти только о пространственных перемещениях объемных элементов того, что представляет собой материальное содержание пространства. Повидимому, отдавая себе во всем этом полный отчет, некоторые противники самой идеи об эфире так настойчиво и так непримиримо протестуют против какого бы то ни было рассмотрения элементарных пространственных перемещений материи, обязательно входящих в структуру всякого физического процесса и, следовательно, входящих в структуру магнитных, электрических и вообще электромагнитных процессов.

г. Резюмируя всё, сказанное выше, можно утверждать, что представление об эфире совершенно неизбежно вытекает из совокупности следующих основных положений:

Положение первое. *Абсолютная пустота есть абстракция. В объективно реальном мире физических явлений не существует никаких, даже беспредельно малых объемных элементов трехмерного пространства, не заполненных движущейся материей.*

Положение второе. *Все без исключения формы и состояния движущейся материи и, между прочим, такие объективные реальности, как электромагнитное поле, постоянное электрическое поле и неизменяющийся магнитный поток, обязательно включают в себе простейшую форму движения, т. е. пространственные перемещения материи (хотя бы и недоступные непосредственному наблюдению).*

Какое бы то ни было отрицание эфира, явное или скрытое, эквивалентно отрицанию справедливости положений первого и второго, обоих вместе или одного из них. И обратно, отрицание справедливости указанных положений эквивалентно отрицанию эфира.

Если кто-либо возражает против признания объективной реальности эфира, то ему следует для обоснования своего принципиального отношения к проблеме эфира прежде всего опровергнуть вышеприведенные положения. А так как этого сделать нельзя, оставаясь на базе правдоподобного миропонимания, то отсюда заключаем, что отрицание эфира должно приводить к ошибочным уклонам в области физического мышления.

Итак, *при рассмотрении различных явлений природы безусловно необходимо исходить из признания объективной реальности эфира, что мы и стремились доказать.* Конечно, потребуется еще какой-то промежуток времени для того, чтобы вышеизложенные соображения были надлежащим образом восприняты и осознаны всеми, пытающимися так или иначе игнорировать представление об эфире, и чтобы была, наконец, преодолена своего рода инерция, характеризующая установки, которые несомненно обречены на сдачу в архив отживших теорий, но всё же продолжают до последнего времени весьма упорно удерживаться в некоторых разделах науки о природе.

§ 5. Магнитный поток как процесс, происходящий в эфире

а. Объединяя всё, изложенное в §§ 1—4, мы приходим к следующим общим выводам:

Во-первых, *магнитный поток есть физическая реальность, являющаяся носителем свойств, которыми обладает магнитное поле.*

Во-вторых, *магнитный поток есть форма движущейся материи.*

В-третьих, *магнитный поток есть процесс, происходящий в эфире и включающий в себе соответствующие пространственные перемещения объемных элементов эфира.*

б. Хотя изучение пространственных перемещений материи, входящих в состав физических реальностей, необходимо признать, вообще говоря, первой задачей той области науки, которая рассматривает свойства и проявления какого-либо разряда этих реальностей, однако можно отметить со всей определенностью, что в отношении магнитного потока указанная задача еще довольно далека от окончательного разрешения. В силу чисто исторических причин, с одной стороны, и вследствие чрезмерного влияния формальных методов исследования физических явлений, с другой стороны, вопросу о природе магнитного потока уделялось недостаточное внимание и даже, особенно в последнее время, нередко высказывалось мнение, якобы подобного рода вопросы представляют собою нечто, не соответствующее достоинству науки. Выявлению полной несостоятельности такой точки зрения и были в значительной степени посвящены предыдущие страницы этой книги.

Из всего того, что прямо или косвенно касается природы магнитного потока и что в разное время было предметом научного исследования, представляется целесообразным прежде всего остановиться вкратце на работе Гельмгольца, посвященной вихревому движению.[1]

---

[1] Helmholtz. Über Integrale der hydrodynamishen Gleichungen, welche de Wirbelbewegungen entsprechen. 1858.

Как известно, идея о том, что вихревое движение играет существенную роль в разнообразных явлениях природы, неоднократно высказывалась рядом мыслителей прежних эпох и, между прочим, еще Декартом, который посвятил этой проблеме немало труда. Но первое строго научное рассмотрение основных свойств вихревого движения бесспорно принадлежит Гельмгольцу. Для того чтобы отвлечься от всяких второстепенных обстоятельств, сопровождающих вихревое движение материи, и сосредоточить внимание только на самых главных, принципиальных особенностях, характеризующих движение этого рода, Гельмгольц подверг математическому анализу вихревое движение в однородной несжимаемой жидкости, которую он назвал „идеальной" в том смысле, что, согласно его предположениям (об этом уже упоминалось выше), такая жидкость лишена какой бы то ни было вязкости, т. е. не имеет никакого внутреннего трения. В предыдущем § 4, посвященном вопросу об эфире, говорилось уже, что необходимо трактовать эфир именно в качестве материальной среды, совершенно не обладающей вязкостью. Отсюда ясно, какое фундаментальное значение имеют работы Гельмгольца при рассмотрении процессов, происходящих в эфире.

Гельмгольц в результате своего исследования, посвященного вихревому движению „идеальной" жидкости, сделал некоторые выводы, до известной степени неожиданные и вместе с тем имеющие чрезвычайно важное значение. Он нашел, что вихревое движение „идеальной" жидкости должно происходить в форме возникающих при этом вихревых шнуров или вихревых нитей, заканчивающихся на границах этой жидкости. Вихревой же нитью Гельмгольц назвал совокупность частиц жидкости, заключенных в некотором объеме трубчатой формы со сравнительно малым поперечным сечением и вращающихся вокруг оси этого трубчатого элемента объема. В случае безграничной „идеальной" жидкости возможны только *замкнутые вихревые кольца*, т. е. в этом случае вихревые нити всегда и безусловно всегда образуют *замкнутые контуры*. Следовательно, вихревое кольцо в безграничной жидкости, не обладающей внутренним трением, никакими физическими воздействиями не может быть разорвано. Иными словами, мы никоим образом не в состоянии так прервать контур подобного вихревого кольца, чтобы обнаружить или вскрыть два конца вихревой нити. Вместе с тем, по Гельмгольцу, эти вихревые кольца *абсолютно неуничтожаемы*. Раз возникшие в „идеальной" жидкости вихревые кольца никогда не прекращают своего существования. Они могут только под влиянием тех или иных условий деформироваться, изменяя свои геометрические размеры. Они могут сокращаться до малых размеров или увеличивать свой контур в зависимости от обстоятельств. Таким образом, вихревое кольцо в „идеальной" жидкости представляет собой и высокой степени устойчивое и совершенно неразрушимое образование. Гельмгольц показал далее, что вдоль оси всякой вихревой нити должно существовать стремление к сокращению или тяжение, а в поперечном направлении — стремление к расширению или давление на окружающие участки среды. Затем заслуживает большого внимания еще один вывод Гельмгольца, а именно что всякое вихревое кольцо не остается неподвижным, но стремится перемещаться в направлении, перпендикулярном к той плоскости, в которой оно находится.

В обычной обстановке, доступной непосредственному наблюдению, мы знаем вихревые образования, например, в форме нередко возникающих в атмосфере смерчей, представляющих собой в ряде случаев грозное явление природы. Смерчом, как известно, называется вихревой столб

иногда очень большой высоты, в объеме которого с большою скоростью вращается воздух и затягиваемые в этот столб пары и капельки воды (со стороны облаков), а также песок, вода, снег и т. п. (со стороны земной поверхности). В качестве второго примера доступных простому наблюдению вихревых образований можно назвать дымовые вихревые кольца (см. § 29 Главы IV), которые легко получаются при помощи несложных приспособлений. Все указанные вихревые образования, конечно, лишь частично уподобляются гельмгольцевским вихрям в „идеальной" жидкости, так как обычная материальная среда обладает весьма заметным внутренним трением, благодаря чему энергия вихревого движения мало-помалу рассеивается и вихрь прекращает существование. Вихревые нити и вихревые кольца в условиях, весьма приближающихся к „идеальной" жидкости Гельмгольца, по всей вероятности, можно было бы наблюдать в переохлажденном гелии, и надо ожидать, что это явится предметом будущих исследований.

в. Есть, однако, физические реальности, свойства которых заставляют пытливый ум естествоиспытателей усматривать полную аналогию с вихревыми нитями Гельмгольца. В проистекающих отсюда гипотезах и теоретических построениях роль безграничной несжимаемой жидкости, лишенной какой бы то ни было вязкости, играет обычно эфир.

В. Томсон (Кельвин), около 75 лет тому назад[1] высказал предположение, что атомы вещества, казавшиеся в ту эпоху абсолютно неразрушимыми и неразложимыми на какие-либо более мелкие частицы вещества, представляют собой именно вихревые кольца в несжимаемой жидкости без внутреннего трения.

В связи с достижениями современной физики эти соображения В. Томсона утратили, конечно, свое непосредственное значение, и его вихревой атом как будто бы отошел в область преданий. Всё же не следует забывать, что сущность идеи этого замечательного исследователя природы остается в полной силе. Ведь В. Томсон, учитывая результаты работ Гельмгольца в области вихревого движения, предположил, что *предельные* элементарные частицы обычного вещества являются вихревыми кольцами. В связи с этим есть полное основание признать, что гипотеза В. Томсона о вихревой природе предельно малых частиц вещества сохраняет очень серьезное значение и в настоящее время, если только вместо атома иметь в виду элементарные составляющие атома (электроны, протоны и т. д.). В зависимости от массы и иных свойств этих составляющих атома они, в полном согласии с общими идеями В. Томсона, могут быть мыслимы в форме каких-то вихревых образований в эфире, начиная от элементарного вихревого кольца соответственно малых размеров до более или менее сложного комплекса или, так сказать, сплетения вихревых колец в эфире. Итак, идеи В. Томсона о строении предельно малых частиц вещества ни в коем случае не могут быть просто отброшены и преданы забвению. Эти чрезвычайно глубокие идеи, повидимому таящие в себе зерно истины, должны быть учтены при дальнейшей разработке проблемы о природе вещества (см. §§ 59—61 Главы VI).

Фарадей, вложивший физическое содержание в наши общие представления о магнитном поле, как известно, сам не высказывал каких-либо соображений о природе „физических" силовых линий магнитного поля, т. е. о составляющих магнитного потока, называемых нами теперь магнитными линиями. Однако, одно из замечательнейших открытий

[1] W. Thomson. „On Vortex Atoms." Proc. Roy. Soc. of Edinburg, 1867, 18 Febr.

Фарадея — мы имеем в виду магнитное вращение плоскости поляризации света — как раз дает повод для весьма правдоподобных предположений о природе магнитного потока. Явление, о котором идет речь, состоит в общих чертах в следующем. Если пучок поляризованного света проходит сквозь какое-либо прозрачное тело в направлении магнитных линий, воздействующих на данное тело, то плоскость поляризации оказывается повернутой на некоторый угол. Величина этого угла зависит от интенсивности магнитного поля, от длины пути, проходимого поляризованным светом в прозрачном теле, и от свойств вещества, из которого состоит данное тело. Наиболее сильно описываемое явление наблюдается в тяжелом, содержащем окислы свинца стекле, которое впервые было изготовлено самим Фарадеем.

В. Томсон (Кельвин) обратил внимание на то, что магнитное вращение плоскости поляризации света внушает мысль о наличии в магнитном поле процессов, имеющих связь с каким-то вращательным движением.[1] Необходимо предполагать далее, что это вращательное движение происходит вокруг осей, совпадающих с направлением тех нитеобразных элементов магнитного поля, которые Фарадей называл „физическими силовыми линиями". Максвелл присоединился к этому мнению В. Томсона. В ряде своих работ,[2] затрагивающих вопрос о природе магнитного поля и о механизме явлений, в нем наблюдаемых, он основывался на вышеуказанных исследованиях Гельмгольца о вихревых движениях в „идеальной" жидкости, т. е. о вихревых нитях. Совершенно естественно возникает представление о магнитных линиях как о вихревых нитях в эфире. Правдоподобность такого представления о природе магнитных линий весьма усугубляется тем обстоятельством, что свойства, которые мы должны на основании работ Фарадея и Максвелла приписывать магнитным линиям, вполне аналогичны свойствам вихревой нити, выведенным Гельмгольцем путем математического анализа для случая безграничной „идеальной" жидкости.

В этом отношении особенно замечательно следующее. Магнитные линии совершенно так же, как и гельмгольцевы вихревые кольца, всегда образуют принципиально замкнутые контуры, которые никакими физическими воздействиями не могут быть прерваны. *Мы никогда не можем обнаружить концов магнитных линий.* Так называемые магнитные массы, на которых якобы заканчиваются магнитные линии, на самом деле представляют собою нечто воображаемое, т. е. фикции, лишь чисто условно вводимые при формальном анализе магнитных явлений. Обо всём этом будет подробнее сказано в §§ 17 и 24 Главы III. Замкнутость контура всякой магнитной линии должна быть рассматриваема в качестве *основного* довода в пользу предположения о том, что магнитные линии являются не чем иным, как именно вихревыми кольцами в эфире, сплошь заполняющем мировое пространство. Даже магнитное вращение плоскости поляризации света в данном отношении далеко не играет столь же важной роли, так как мыслимы и иные, быть может, однако, менее естественные объяснения этого явления, помимо предположения о вращательном характере процессов, происходящих в магнитном поле. Принципиальную же замкнутость контура магнитной линии можно понять только на базе утверждения, что магнитная линия и вихревая нить в безграничном эфире есть одно и то же.

---

[1] W. Thomson. Proceedings of the Royal Society, June 1856.

[2] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, §§ 821—831; Philosophical Magazine, March, April and May, 1861, Jan. and Febr. 1862.

Насколько глубоко идет аналогия между магнитными линиями и вихревыми нитями в эфире, видно из того, что магнитные линии, по Фарадею и Максвеллу, должны быть рассматриваемы в качестве нитеобразных элементов магнитного потока, обладающих стремлением сокращаться в продольном направлении и расширяться в поперечном направлении, т. е. обладающих и в этом отношении как раз теми же свойствами, которые, согласно выводам Гельмгольца, присущи вихревым нитям в „идеальной" жидкости.

г. Некоторые ученые, занимавшиеся вопросом о природе электромагнитных явлений, в том числе Дж. Дж. Томсон, сделали попытку отожествить с вихревыми нитями в эфире не магнитные линии, а предполагаемые нитевидные элементы электрического поля, названные Дж. Дж. Томсоном „фарадеевскими трубками". Однако такое предположение в высокой степени неправдоподобно, так как мы на опыте несомненно имеем дело с концами фарадеевских трубок, когда они начинаются с положительных зарядов и заканчиваются на отрицательных зарядах. Вихревые же нити в безграничном эфире *обязательно* должны образовывать замкнутые контуры. Концы этих нитей не могут быть обнаруживаемы, если впрочем не сделать дополнительного допущения, что электрические заряды представляют собою, так сказать, инородные объекты в среде эфира и что поверхность раздела заряда и окружающего его эфира может трактоваться в качестве границы областей пространства, заполненных эфиром. Но такое предположение опять-таки весьма неправдоподобно. Мы уже указывали, что современная наука дает немало оснований для утверждения, что электроны, позитроны и протоны, которые мы рассматриваем как элементарные электрические заряды, являются какими-то комплексами, имеющими электромагнитный характер. Электромагнитные же процессы мы не можем мыслить оторванно от эфира. Наконец, говорить в настоящее время о каких-то строго определенных границах, отделяющих элементарные электрические заряды от окружающего пространства, совсем не приходится.

Таким образом, фарадеевские трубки никак не могут быть отожествляемы с гельмгольцевыми вихревыми нитями. С магнитными же линиями можно установить полную аналогию этих нитей. Поскольку всё-таки электрические и магнитные поля по своей природе имеют теснейшую связь между собою, то надо полагать, что и процессы, происходящие в электрическом поле, имеют некоторое отношение к вихревым движениям в эфире, но только участие этих вихревых движений в структуре электрического поля должно носить какой-то иной, быть может, значительно более сложный характер, чем в случае магнитного поля. На вопросе о фарадеевских трубках и о неправдоподобности предположений Дж. Дж. Томсона касательно их соотношения с магнитным полем мы еще остановимся в § 65 Главы VI.

д. Изложенные выше соображения во всяком случае позволяют утверждать, что гельмгольцевы вихревые нити по своим свойствам наиболее исчерпывающим образом соответствуют магнитным линиям.

На данном этапе наших знаний об электромагнитных явлениях можно, следовательно, считать в высокой степени вероятным, что *магнитные линии представляют собой именно замкнутые вихревые нити в эфире.*

Такой вывод может служить в качестве некоторого подтверждения справедливости выдвинутого Фарадеем положения, согласно которому физический процесс, происходящий в магнитном поле, так сказать, расчленяется на элементарные трубчатые или нитевидные составляющие.

В этом отношении представляют также интерес следующие соображения Максвелла, высказанные им по поводу гипотезы В. Томсона (Кельвина) о связи магнитного вращения плоскости поляризации света с каким-то вращательным движением в магнитном поле:

„...очевидно, что это вращение не может быть вращением среды как целого около некоторой оси, так как магнитное поле может иметь некоторую ширину и нет никаких доказательств существования движения, скорость которого возрастает с расстоянием от одной постоянной линии в поле. Если существует здесь вращательное движение, то оно должно быть вращением весьма малых участков среды, каждого около его собственной оси, так что среда должна распадаться на множество молекулярных вихрей".[1]

Итак, руководствуясь идеями Фарадея, Кельвина и Максвелла, мы будем трактовать нитевидные элементы магнитного поля, т. е. магнитные линии, как дискретные физические реальности, заполняющие пространство, занятое магнитным полем, и являющиеся вихревыми нитями в эфире.

е. В качестве добавочного и очень важного аргумента в пользу фарадеевских представлений об общей структуре магнитного потока необходимо принять во внимание и следующее обстоятельство. Дело в том, что одним из крупнейших достижений современной физической науки является развитие и конкретизация идеи о квантовании. Мы говорим о квантовании в самом широком смысле этого слова. Сущность идеи о квантовании заключается в признании того, что во всех наблюдаемых нами явлениях природы мы встречаемся с некоторыми элементарными физическими реальностями, каждая из которых может быть рассматриваема в известном отношении как некое самостоятельное целое. Так, мы имеем дело с молекулами и атомами вещества, с мельчайшими частицами материи, входящими в состав атома, с элементарными электрическими зарядами, с определенными порциями лучистой энергии, применительно к которым и был впервые применен термин „квант". Идея о квантовании сыграла очень важную роль и в развитии современного учения о строении атома.

Вообще говоря, электромагнитная концепция физических явлений всё более и более укрепляется. Квантовая теория, в конце концов, всегда имеет дело с каким-то электромагнитным комплексом той или иной сложности. Будет уместно отметить, что первое указание на квантование в области процессов электромагнитного характера можно и должно усмотреть не только в соображениях Фарадея об элементарном количестве электричества, проявляющемся при электролизе, но и в его идеях о физически существующих элементах магнитного потока. В настоящее время, когда можно с уверенностью сказать, что наукой о природе окончательно установлено наличие во всех физических реальностях элементарных дискретных составляющих, представляется совершенно неправдоподобной мысль, будто бы такая физическая реальность, как магнитный поток, является чем-то сплошным и не расчленяемым на элементарные части. С этой точки зрения фарадеевские „физические силовые линии" магнитного поля, т. е. нитевидные элементарные составляющие магнитного потока, можно назвать *квантами магнитного потока.*

---

[1] Maxwell. Ether, „Encyclopaedia Britannica". См. перевод этой статьи „Эфир" в сборнике: „Джемс Кларк Максвелл. Речи и статьи". Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1940.

Совершенно подобное же высказывание Максвелла содержится и в его A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 822.

ж. В заключение настоящей Главы необходимо особо подчеркнуть, что *основные фарадее-максвелловские представления, касающиеся магнитного поля, весьма удовлетворительно согласуются со всеми известными опытными данными, имеют все признаки непосредственного отношения к природе самых разнообразных проявлений магнитного потока и, повидимому, заключают в себе в потенциальном виде возможности дальнейшего углубления в существо электромагнитных явлений как макрофизических, так и микрофизических.*

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ

§ 6. Общие соображения

Как было уже отмечено в § 1, в силу причин чисто исторического характера все основные определения и понятия, которыми мы обычно пользуемся при описании и исследовании магнитных явлений, носят на себе более или менее явный отпечаток представлений, возникших в связи с механическими проявлениями магнитного поля, так как именно они были прежде всего изучены. В настоящее время, когда стал значительно шире круг известных и изученных проявлений этого поля, когда работы Фарадея, Максвелла и ряда других ученых дали много материала для суждения о природе процессов, происходящих в магнитном поле, и о его наиболее вероятной структуре, естественно возникает мысль о том, чтобы вложить несколько иное физическое содержание в указанные определения и понятия.

В предыдущих параграфах было в достаточной мере разъяснено коренное различие двух главных точек зрения, которыми наука руководствовалась при рассмотрении явлений из области магнитизма. Речь идет о точке зрения действия на расстоянии, нашедшей свое отражение в законе Кулона, в теореме Гаусса, в законе Био-Савара-Лапласа и в других математических соотношениях, и о фарадее-максвелловской точке зрения, согласно которой всякого рода взаимодействия, наблюдаемые в магнитном поле, представляют собою результат специфических процессов в материальной среде, находящейся между взаимодействующими системами и окружающей их. Конкретно вторая точка зрения отразилась в представлении о магнитном потоке как носителе свойств магнитного поля и в математических соотношениях, связанных с этим представлением (например, закон электромагнитной индукции).

Указанные две точки зрения, совершенно непримиримые и взаимно исключающие одна другую при рассмотрении природы магнитных явлений, приводят к тождественным результатам при математическом анализе данных явлений и в этом отношении могут быть, так сказать, синтезированы. Как известно, именно Максвелл дал математический синтез этих точек зрения в своем „Трактате об электричестве и магнитизме“ и показал, что обе точки зрения математически вполне эквивалентны, хотя они и не во всех случаях одинаково удобны практически. Путем простых математических преобразований легко можно перейти от символов, определяемых одной точкой зрения, к символам, соответствующим другой.

Итак, в отношении получаемых численных результатов не существует никаких противоречий между тем, что вытекает из идей Фара-

дея-Максвелла, и тем, что мы можем получить, исходя из точки зрения действия на расстоянии. По этой-то причине нет какой бы то ни было возможности непосредственно на опыте решить, какая из двух точек зрения наиболее точно соответствует природе вещей. Любой мыслимый эксперимент мы можем описать и математически проанализировать, исходя и из одной точки зрения и из другой. Окончательный результат во всех случаях должен получиться один и тот же. Только путем специального рассмотрения общих условий, в которых могут осуществляться наблюдаемые в природе взаимодействия, достигается вполне определенный ответ на вопрос о степени соответствия каждой из двух антагонирующих установок тому, что происходит в действительности. И при этом оказывается, что представление о действии на расстоянии есть абсурд в физическом смысле, так как взаимодействия, наблюдаемые в природе, могут осуществляться только при непременном участии промежуточной среды. Предыдущая Глава I была в значительной степени посвящена рассмотрению данного вопроса.

Для пояснения сказанного выше о математической эквивалентности двух сравниваемых точек зрения остановимся в качестве простейшего примера на случае механического взаимодействия двух магнитных полюсов. Силу, приложенную к любому из полюсов, можно определить двумя методами. Один метод, основанный на представлении об активном участии промежуточной среды, рассматривает тяжения магнитных линий, связанных с данным магнитным полюсом и исходящих из него или заканчивающихся на нем. Механическая сила, действующая на этот полюс, является равнодействующей всех указанных тяжений, т. е. представляет собою интегральное тяжение, слагающееся из элементарных тяжений реально существующих магнитных линий. Это интегральное тяжение мы и воспринимаем в качестве так называемой кулоновской силы, которую можно вычислить, исходя непосредственно из закона Кулона. В таком случае мы будем пользоваться вторым, чисто формальным методом, основанным на точке зрения действия на расстоянии и на оперировании с фиктивными магнитными массами.

В рассмотренном примере второй метод, связанный с применением закона Кулона, сразу же и при том в высокой степени просто приводит нас к определению величины искомого эффекта. Было бы поэтому совершенно нецелесообразно воздерживаться от пользования формальными приемами там, где это упрощает расчет, если мы вместе с тем вполне ясно учитываем условность допущений и символов, которые оказываются нам необходимыми и полезными в процессе математических операций. Фиктивные магнитные массы как раз представляют собой яркий пример такого рода условных допущений. Во всяком случае несомненно, что закономерное использование в математических операциях основных кулоновских допущений, в том числе и фиктивных магнитных масс, не может привести ни к каким недоразумениям в смысле правильности и точности окончательного результата всех расчетов. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что есть немало случаев, когда только фарадее-максвелловский метод описания и анализа явлений дает возможность вести наши рассуждения и расчеты чрезвычайно просто и в полном соответствии с тем, что может происходить в действительности, не вводя при этом осложняющих понятий и символов, которые имеют чисто условный характер.

Полагая, что все определения и соотношения, относящиеся к области магнитных явлений, в основном уже хорошо известны читателю, мы в последующих параграфах этой Главы не преследуем цели просто

напомнить их в систематическом изложении. Наша задача состоит лишь в том, чтобы вкратце коснуться физического смысла некоторых главнейших из этих определений и соотношений и по возможности выяснить, в какой связи они находятся с представлением о магнитном потоке. При этом мы предварительно остановимся на методе обследования магнитного поля, основанном на индуктивных проявлениях магнитного потока.

§ 7. Магнитный поток

а. Фарадей в ряде случаев использовал явление электромагнитной индукции для количественного обследования магнитного поля. Не подлежит сомнению, что таким путем можно было бы обосновать систему величин, характеризующих это поле.[1] Действительно, установленный Фарадеем закон электромагнитной индукции, а также в высокой степени правдоподобные представления о структуре магнитного поля, созданные им в результате всестороннего анализа явлений, наблюдаемых в этом поле, позволяют просто подойти к количественному описанию всего того, что происходит в магнитном поле. Вместе с тем следует утверждать, что фарадеевский метод рассмотрения магнитного поля, дает возможность соблюдать при этом большее соответствие с действительной природой магнитных явлений, чем в том случае, когда мы исходим из чисто условных представлений о фиктивной магнитной массе и о действии на расстоянии. По данному поводу Максвелл, между прочим, говорит:

> „Метод, оказавшийся в руках Фарадея значительно более мощным, состоял в использовании этих линий магнитной силы, которые всегда были перед его мысленным оком, когда он созерцал свои магниты или электрические токи, и выслеживание которых при посредстве железных опилков он правильно рассматривал[2] в качестве в высокой степени ценной помощи экспериментатору".[3]

При количественном изучении магнитного поля, помимо идеи Фарадея о физически существующих нитеобразных элементах магнитного потока, т. е. о магнитных линиях, особо важное значение имеет установленный им же принцип непрерывности контура каждой магнитной линии (см. подробное рассмотрение этого принципа в § 17 Главы III).

Представим себе теперь так называемую „пробную" катушку небольших размеров, например диаметром в 1 см или меньше, имеющую плоскую форму и состоящую из достаточно большого числа витков тонкой изолированной проволоки. Присоединим данную катушку гибкими проводниками к баллистическому гальванометру и внесем ее в обследуемое магнитное поле. При этом в зависимости от общих условий расположения пробной катушки ее витки будут охватывать то или иное количество магнитных линий. Быстро удалив затем катушку из области магнитного поля, мы пересечем витками катушки все охватываемые ими магнитные линии, и в связи с этим в замкнутой цепи, в которой находится баллистический гальванометр, возникает кратковременный индуктированный ток, вследствие чего будет наблюдаться отброс гальванометра. Направление отброса, как известно, может быть то или иное в зависимости от направления пересекаемых витками катушки магнитных линий.

---

[1] См., например, Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, ser. XXIX.

[2] „Exp. Res., 3234".

[3] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 541.

Этот отброс, или, точнее сказать, угол отклонения баллистического гальванометра, при прочих равных условиях, будет прямо пропорционален количеству охватывавшихся витками катушки и затем пересеченных ими магнитных линий. Это вытекает из основного положения, установленного Фарадеем в связи с его многочисленными экспериментами в области электромагнитной индукции. Таким образом, помощью пробной катушки можно получить данные для суждения о распределении магнитного потока в пространстве, занятом магнитным полем, и для определения степени густоты магнитных линий в каждом данном месте поля. Всё это позволяет нам вообще составить представление об интенсивности специфического магнитного процесса в различных участках поля.

Само собою разумеется, что количество пересеченных магнитных линий при удалении пробной катушки и соответственно угол отброса баллистического гальванометра будут в сильной степени зависеть, кроме всего прочего, от того, как была вначале ориентирована пробная катушка относительно направления магнитных линий в данном месте поля. Опыт показывает, что угол отброса будет максимальным, когда катушка расположена в некоторой определенной плоскости или когда она повернута на 180° вокруг оси, лежащей в той же плоскости. При всяком ином расположении катушки угол отброса баллистического гальванометра будет меньше и, в частности, он будет равен нулю при расположении катушки перпендикулярно плоскости максимального индуктивного эффекта. В последнем случае отсутствие отклонения гальванометра свидетельствует о том, что в начальном положении витки катушки не охватывали никакого магнитного потока, иными словами, что магнитные линии были касательными к плоскости катушки. В случае же максимального отброса гальванометра витки катушки, очевидно, охватывали наибольшее возможное количество магнитных линий в данном месте поля, т. е. катушку пронизывал максимальный магнитный поток. В связи со всем сказанным, при обследовании магнитного поля посредством индуктивного эффекта, производимого в пробной катушке, необходимо всегда так подбирать ее начальное положение, чтобы отброс баллистического гальванометра и, следовательно, указанный индуктивный эффект были наибольшими в каждом данном участке поля. В таком случае определяется также общее направление магнитного потока и составляющих его магнитных линий в том месте поля, где находилась катушка. Именно, в этом случае магнитный поток и магнитные линии пронизывали катушку нормально по отношению к плоскости ее начального расположения. Положительное же направление обследуемого магнитного потока определяется, как известно, по направлению индуктированного тока. Это есть то направление, в котором стремился бы двигаться положительный (северный) полюс какого-либо магнита, расположенного в данном поле.

Вообще принято обозначать величину магнитного потока буквой Ф. В тех случаях, когда при рассмотрении проявлений электромагнитной индукции необходимо особо подчеркнуть, что речь идет именно о пересекаемых магнитных линиях, входящих в состав некоторого потока Ф, мы будем это отмечать значком в виде двух точек, т. е. будем писать Φ''.

Закон электромагнитной индукции в том виде, как он непосредственно вытекает из опытов Фарадея, может быть сформулирован следующим образом (см. § 18 Главы III):

$$q = \left| \frac{\Phi''}{r} \right|.$$

Здесь q есть количество электричества, протекшего за время процесса электромагнитной индукции через поперечное сечение проводящей

цепи и измеряемое обычно при помощи баллистического гальванометра. Φ'' — магнитный поток, первоначально охватывавшийся контуром цепи и затем пересекаемый этим контуром. Кроме того, в указанное соотношение входит r — электрическое сопротивление цепи, которая в рассматриваемом частном случае заключает в себе пробную катушку и баллистический гальванометр.

На основании вышеприведенного соотношения можем написать:

$$|\Phi''| = rq.$$

Таким образом, можно дать следующее определение величины магнитного потока:

Магнитный поток, охватываемый контуром некоторой проводящей цепи, по своему численному значению равен произведению электрического сопротивления цепи на количество электричества, протекшего по этой цепи за время пересечения магнитного потока ее контуром.

При этом предполагается, что после окончания процесса электромагнитной индукции контур цепи больше не пронизывается данным потоком.

В § 18 Главы III мы подробнее рассмотрим вопрос о формулировках закона электромагнитной индукции. Для общих же соображений относительно физического значения главнейших понятий, которыми мы обычно характеризуем проявления магнитного поля, вполне достаточно иметь в виду основную фарадеевскую формулировку этого закона, о которой только что шла речь.

б. Опыт показывает, что вещество (в твердом, жидком или газообразном виде), помещенное в магнитном поле, принимает активное участие в магнитных явлениях. Поэтому необходимо строго различать основной магнитный процесс, происходящий в „пустоте", т. е. в эфире, и тот добавочный процесс, который привносится благодаря участию вещества. Результирующий магнитный процесс есть сумма первого и второго.

Всякое вещество, вообще говоря, проницаемо для магнитного потока в большей или меньшей степени. Так называемые парамагнитные тела как бы сгущают в себе внешний магнитный поток, в сфере влияния которого они находятся, а диамагнитные тела, наоборот, оказываются менее проницаемыми для магнитного потока, чем „пустота" (эфир). Всё это находит себе полное объяснение с точки зрения современных воззрений на природу вещества. Как теперь установлено наукой, атомы обычного вещества представляют собой некоторые электромагнитные комплексы, в состав которых входят электроны, чрезвычайно быстро движущиеся по соответствующим орбитам вокруг центрального положительно заряженного ядра. Электромагнитными же комплексами являются, следовательно, и молекулы вещества и более сложные участки или области вещества. Электронные орбиты мы имеем право рассматривать как контуры токов атомного масштаба. Таким образом, давно уже высказанная Ампером гипотеза молекулярных токов получает благодаря современным успехам науки несомненное подтверждение. В обычных условиях эти многочисленные атомные токи, связанные, конечно, со свойственными им магнитными потоками атомного же масштаба, ориентированы по самым разнообразным направлениям. В связи с этим указанные атомные магнитные потоки замыкаются практически в пределах данного тела, так что оно само по себе не обнаруживает заметным образом происходящих в нем магнитных процессов. Когда же тело помещено в какое-либо постороннее магнитное поле, т. е. подвергается воздействию внешнего магнитного потока, то здесь могут быть два случая.

Если элементарные магнитные потоки выходят за пределы атомов, то эти атомы ведут себя подобно микроскопическим магнитным стрелкам и поворачиваются под действием внешнего поля, так что их магнитные потоки в большей или меньшей степени сливаются с внешним потоком и в результате этот внешний магнитный поток как бы сгущается в данном теле. Это — случай *парамагнитных* тел. Особенно сильно проявляется указанное поведение вещества в так называемых ферромагнитных телах, в которых, помимо магнитных потоков, связанных с движением электронов по орбитам, надо, повидимому, считаться еще с предполагаемым вращением электронов вокруг своих осей, что также должно быть ассоциируемо с соответствующими этому вращению добавочными внутриатомными магнитными потоками (так называемый „спин" электронов). Быть может, однако, здесь суть дела не в том, что электроны якобы вращаются вокруг своих осей, а в том, что электроны по самой природе своей тесно связаны с какими-то элементарными магнитными потоками, входящими в структуру электронов и при некоторых условиях обнаруживающимися в виде „спина". Ведь электрон не есть нечто предельно простое и дальше неразложимое, не есть какой-то предельно малый шарик из „электричества". Как мы уже отмечали, природа вообще неисчерпаема во всех своих проявлениях. И электрон, имеющий несомненно электромагнитный характер, конечно, обладает некоторой структурой, в состав которой обязательно должен входить и соответствующий магнитный процесс.

Другой случай, именно случай *диамагнитных* тел, отличается от вышерассмотренного тем, что атомы диамагнитных тел оказываются, так сказать, нейтральными в отношении внешнего магнитного поля. Элементарные магнитные потоки этих атомов образуют прочные системы, замкнутые на себя, и не сливаются с внешним магнитным потоком. Однако благодаря воздействию внешнего магнитного поля скорости движения электронов по орбитам внутри таких атомов изменяются, т.е. изменяются внутриатомные токи. Следовательно, всё происходит так, как будто бы внутри атомов возникают дополнительные токи, происхождение которых связано с явлением электромагнитной индукции. Эти дополнительные токи препятствуют проникновению внешнего поля внутрь атомов, и внешний магнитный поток вынужден обходить объем, занятый каждым атомом такого рода. В результате диамагнитное тело оказывается менее проницаемым для внешнего магнитного потока, чем „пустота" (эфир).

При общем рассмотрении поведения различных тел в магнитном поле мы обычно описываем всё это с макроскопической точки зрения и довольствуемся учетом лишь интегрального эффекта внутриатомных процессов, не вникая в детали того, что происходит в атомах вещества. Надлежащим выбором величин, характеризующих общие магнитные свойства вещества, можно в достаточной степени точно подвергнуть анализу всё то, что привносит вещество своим участием в основных проявлениях магнитного потока.

В связи со сказанным выше уместно здесь же вкратце коснуться вопроса о фиктивных „магнитных массах". Представление об этих массах, якобы находящихся на поверхности полюсов магнитов, могло казаться хоть до некоторой степени правдоподобным лишь тогда, когда вещество магнитов рассматривалось как нечто сплошное и однородное. Теперь же мы хорошо знаем об атомной структуре вещества и об электромагнитной природе атомов; знаем, что свойства магнитов аналогичны свойствам соленоидов, обтекаемых электрическим током. Следовательно, магнитные массы на полюсах магнитов должны быть отнесены

к области таких же чисто условных представлений, как если бы мы допустили существование подобных таинственных масс на концах проволочной катушки, по которой идет ток. Это иногда может быть удобно при математическом описании магнитных явлений, но не имеет прямого отношения к тому, что происходит в действительности. Мы остановимся подробнее на вопросе о фиктивных „магнитных массах" в § 24 Главы III.

Когда в магнитном поле размещены какие-либо твердые тела и мы желаем обследовать распределение магнитного потока методом пробной катушки, совершенно естественно возникает вопрос, как применять этот метод, если мы не в состоянии вводить катушку внутрь твердого тела. Действительно, в этом отношении встречаются некоторые затруднения. Однако, как известно, в отдельных частных случаях и здесь при помощи индуктивного эффекта можно в достаточной степени точно установить распределение магнитного потока. Все области пространства вне твердых тел просто обследуются, конечно, обычной пробной катушкой. В случае, если данное твердое тело по своей форме допускает нанесение на различные его участки витков изолированной проволоки так, что их легко снимать и удалять из области магнитного поля, то эти специально наложенные витки, присоединяемые, само собой разумеется, к баллистическому гальванометру, позволяют определить величину магнитного потока, проходящего через окруженное витками сечение рассматриваемого тела. В других случаях, когда форма тела не допускает быстрого снятия и удаления наложенных витков, возможно измерить величину пронизывающего их магнитного потока, воздействуя на внешнее намагничивающее поле и изменяя его направление на обратное, что соответствует двойному индуктивному эффекту. Само по себе поведение того или иного вещества в магнитном поле, независимо от формы изготовленного из него тела, может быть изучаемо при помощи индуктивного же метода, если изготовить, например, длинный стержень из исследуемого вещества и поместить на его средней части пробную катушку, сквозь которую стержень проходит. Если при этом стержень подвергается воздействию внешнего магнитного поля, направленного вдоль стержня, то, быстро снимая катушку с неподвижного стержня, мы будем в состоянии по отбросу баллистического гальванометра измерить величину магнитного потока, проходящего через среднее сечение стержня. Производя этот опыт в условиях того же поля, но без стержня, мы получим данные для суждения об основном магнитном процессе, происходящем в эфире при отсутствии изучаемого вещества. Таким образом, может быть выяснена степень участия вещества в магнитных процессах, протекающих в тех или иных условиях. Те же измерения можно осуществить, не удаляя пробной катушки, а лишь изменяя направление внешнего магнитного поля на обратное направление. Так именно и поступают в большинстве случаев.

Итак, количественное обследование распределения магнитного потока в пространстве может быть выполнено во всех случаях при помощи метода, указанного Фарадеем.

§ 8. Плотность магнитного потока. Магнитная индукция

При изучении распределения магнитного потока с помощью плоской пробной катушки мы получаем возможность судить, как это уже указывалось в предыдущем параграфе, о густоте магнитных линий, или иначе сказать, о плотности магнитного потока, т. е. об отношении вели-

чины магнитного потока, пронизывающего некоторую поперечную площадку, к величине этой площадки. Плотность магнитного потока принято обозначать буквой B. В случае магнитного поля, которое характеризуется неизменностью направления и одинаковой густотой магнитных линий в рассматриваемом участке поля, плотность магнитного потока выражается, следовательно, соотношением

$$B = \frac{\Phi}{s},$$

где Φ — магнитный поток, нормально пронизывающий площадку, величина которой s. В частном случае пробной катушки Φ есть поток, охватываемый витками катушки, а s есть величина поверхности, ограниченной витками, причем Φ измеряется по отклонению баллистического гальванометра с учетом, конечно, числа витков. Если магнитное поле неоднородно, то для суждения о плотности магнитного потока в каждой точке поля необходимо перейти к пределу указанного соотношения, имея в виду магнитный поток, пронизывающий бесконечно малую площадку, расположенную поперек потока. Обозначая эту элементарную площадку через ds и соответствующий ей магнитный поток через $d\Phi$, можем, следовательно, написать

$$B = \frac{d\Phi}{ds}.$$

Данное соотношение, определяющее величину B в любой точке, справедливо при сколь угодно неоднородном поле.

Плотность магнитного потока, т. е. величину B, принято называть *магнитной индукцией*. Этот термин возник первоначально в связи с изучением поведения вещества, помещенного в магнитном поле. Вещество в данном случае приобретает характерное магнитное состояние, и это описывают словами: в веществе *наводится* магнитное состояние. Иностранное слово „induction“ обозначает именно „наведение“. Таким образом, термин „магнитная индукция“ эквивалентен термину „магнитное наведение“.

Магнитная индукция B есть вектор, направление которого в каждой точке поля совпадает с направлением магнитного потока.

Из приведенного выше соотношения вытекает

$$d\Phi = B\,ds.$$

Если направление вектора магнитной индукции составляет угол α с нормалью к площадке ds, то выражение для бесконечно малого потока приобретает следующий вид:

$$d\Phi = B\cos\alpha\,ds.$$

Вообще же магнитный поток, пронизывающий некоторую поверхность S, выражается, как известно, так:

$$\Phi = \int_s B\cos\alpha\,ds,$$

где интегрирование распространяется по всей поверхности S.

Таким образом, *магнитный поток есть поток вектора магнитной индукции.*

Магнитную индукцию в „пустоте“, т. е. в эфире, мы будем обозначать через B_0 и рассматривать ее в качестве характеристики основного процесса, происходящего в магнитном поле. Вещество, внесенное в это поле, обычно всегда, как сказано выше, принимает участие в магнитных явлениях и привносит от себя некоторое добавление к величине магнитной индукции в каждой точке поля. Следовательно, можем написать

$$B = B_0 + \Delta B.$$

Итак, результирующая магнитная индукция B слагается из двух составляющих. Первое из них есть B_0 — основная магнитная индукция, характеризующая процесс в эфире, а через ΔB обозначена вторая составляющая, которая выражает собою интегральный добавочный эффект, обусловливаемый веществом как таковым. Если вещество изотропно, векторные величины B_0 и ΔB имеют одно и то же направление и потому могут слагаться алгебраически. В случае же, когда вещество анизотропно, направление векторов B_0 и ΔB, как известно, может быть неодинаковым и в связи с этим сложение их необходимо производить геометрически.

§ 9. Единичные трубки магнитной индукции. Магнитные линии

Представим себе кривую, так построенную в магнитном поле, что в каждой точке элемент этой линии совпадает по направлению с вектором магнитной индукции в данной точке. Такие кривые называются *линиями магнитной индукции*.[1] Общий характер расположения линий магнитной индукции, как известно, очень наглядно иллюстрируется так называемыми магнитными спектрами получаемыми при посредстве железных опилков.

Линии магнитной индукции следует рассматривать как чисто геометрические построения, число которых в любом магнитном поле может быть беспредельно велико.

Трубкою магнитной индукции называется участок магнитного поля, окруженный и ограниченный трубчатой поверхностью, образующими которой являются линии магнитной индукции, направленные вдоль трубки. Не трудно показать, что магнитный поток сквозь любое поперечное сечение s трубки магнитной индукции есть величина постоянная, т. е.

$$\Phi = \int_s B \cos \alpha \, ds = \text{Const.}$$

Действительно, это непосредственно вытекает из принципа непрерывности магнитного потока. Согласно этому принципу, элементарные нитевидные составляющие потока всегда образуют замкнутые контуры, нигде не прерывающиеся. Из определения трубки магнитной индукции следует, что во всех точках боковой поверхности такой трубки нормальная составляющая магнитной индукции равна нулю. Таким образом, магнитный поток, охваченный данной трубчатой поверхностью, нигде не

[1] Иногда для обозначения линии магнитной индукции пользуются термином „индукционная линия“. Однако этот сокращенный термин неудобен в том отношении, что с одинаковым правом он применим и к электрическому полю для обозначения линий электрической индукции. Следует также заметить, что термин „линия магнитной индукции“ не должен быть отождествляем с термином „силовая линия“, имеющим иной смысл (см. § 11).

выходит за пределы трубки и полностью сохраняет свою величину вдоль всей трубки, так что через различные поперечные сечения ее проходит один и тот же поток.

Мы всегда можем так подобрать поперечное сечение трубки магнитной индукции, чтобы при принятых единицах измерения величин, характеризующих магнитное поле, соблюдалось следующее соотношение:

$$\Phi_1 = \int_s B \cos \alpha \, ds = 1.$$

Удовлетворяющие этому соотношению трубки называются *единичными трубками магнитной индукции.*

Можно подразделить весь объем, занимаемый магнитным полем, на единичные трубки магнитной индукции. Ясно, конечно, что величина некоторого магнитного потока равна числу таких единичных трубок, входящих в состав рассматриваемого потока.

Выше, касаясь в § 1 воззрений Фарадея по вопросу о природе и структуре магнитного поля, мы назвали магнитными линиями те нитеобразные элементы, из которых слагается магнитный поток и которые он называл „физическими силовыми линиями" магнитного поля. Теперь, пользуясь представлением о единичных трубках магнитной индукции, мы по существу идем по пути, указанному Фарадеем,[1] на что ссылается и Максвелл.[2]

В связи с чистой условностью выбора единичной трубки магнитной индукции мы в дальнейшем будем называть *элементарными магнитными линиями* то, что Фарадей мыслил в качестве реально существующих нитевидных составляющих магнитного потока. Термин же *магнитная линия*, мы будем применять для обозначения именно единичной трубки магнитной индукции, ассоциируя понятие линии с осью этой трубки. Пользуясь указанными терминами, мы в известной степени считаемся с языком Фарадея, который говорил о „физических силовых линиях" магнитного поля.

То, что мы назвали элементарной магнитной линией, является по существу элементарной трубкой магнитной индукции. Оставляем в стороне вопрос о том, каковы истинные поперечные размеры подобных элементарных трубок. Для более или менее точного решения этого вопроса в настоящее время нет еще достаточных данных. Можно сказать только следующее. По всей вероятности реально существующие нитеобразные элементы магнитного потока имеют чрезвычайно малые поперечные размеры, ничтожно малые по сравнению с размерами условно принятой единичной трубки магнитной индукции. В этом отношении всё происходит, повидимому, так же, как и в случае измерения количеств электричества. В настоящее время наука установила, что в природе существует элементарный заряд, являющийся, надо полагать, пределом дробления любого количества электричества. Мы имеем в виду заряд электрона. Это есть *естественная* единица количества электричества. Установленная же чисто условно единица для измерения количеств электричества во много раз больше заряда электрона. Как известно, с достаточною для практики точностью можно принять, что один кулон содержит в себе $6{,}281 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов электрона. Весьма правдоподобно предположение, что с этим большим числом до некоторой степени сравнимо количество физически существующих элементарных трубок магнитной индукции, соответствующих условной единичной трубке.

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, 3122.
[2] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 541.

Итак, магнитная линия является единицей, служащей для измерения магнитного потока. При этом единицей магнитной индукции, т. е. плотности магнитного потока, будет одна магнитная линия на единицу поверхности.

В абсолютной электромагнитной системе единиц, в которой за единицу длины принят сантиметр, за единицу массы — грамм и за единицу времени — секунда, установлена единица магнитного потока, названная *максвеллом*. Таким образом, магнитную линию, т. е. единичную трубку магнитной индукции, мы можем называть одним максвеллом. Соответствующей единице магнитной индукции присвоено наименование *гаусс*. Из сказанного выше следует, что соотношение между максвеллом и гауссом имеет такой вид:

$$1\ Gs = \frac{1\ Mx}{1\ cm^2},$$

или

$$1\ Mx = 1\ Gs \cdot 1\ cm^2.$$

В рассматриваемой системе единица электродвижущей силы равна 10^{-8} вольта. С этой единицей электродвижущей силы и согласован максвелл в качестве единицы магнитного потока. Именно, *один максвелл есть магнитный поток, при равномерном убывании которого в течение одной секунды до нуля в охватывающем его контуре индуктируется электродвижущая сила, равная 10^{-8} вольта.*

В абсолютной практической электромагнитной системе, в которой за единицу длины принят метр, за единицу массы — килограмм и за единицу времени — секунда, единица магнитного потока названа *вебером*. Соотношение между вебером и максвеллом выражается так:

$$1\ Wb = 10^8\ Mx.$$

Единица магнитной индукции в этой же практической системе есть *вебер на квадратный метр*.

Ясно, конечно, что имеется следующая связь между этой единицей магнитной индукции и гауссом:

$$1\ \frac{Wb}{m^2} = \frac{10^8 Mx}{10^4\ cm^2} = 10^4\ Gs.$$

Введение практической единицы магнитного потока, названной вебером, устраняет в приведенном выше определении единицы магнитного потока коэффициент 10^{-8}. Получается простое соотношение между вебером и вольтом:

$$\frac{1\ Wb}{1\ \text{sec}} = 1\text{V}.$$

Резюмируя сказанное о единицах магнитного потока, можем написать:

$$1\ Wb = 10^8\ Mx = 1\text{V} \cdot 1\ \text{sec}.$$

§ 10. Магнитная масса. Закон Кулона

Как мы уже указывали выше, закон Кулона для магнитных взаимодействий был первым количественным соотношением, установленным в области изучения магнитного поля. Представления, вытекающие из

закона Кулона, легли в основание системы величин, которые не имеют непосредственного отношения к явлению электромагнитной индукции, но также оказываются весьма полезными при изучении магнитного поля.

Кулон показал, что механические взаимодействия магнитных полюсов могут быть описаны и подвергнуты анализу при посредстве допущения, что на поверхности полюсов расположены гипотетические магнитные массы. Мы останавливались уже на чистой условности представления о магнитных массах, которые в действительности не существуют.[1] Однако совершенно отказаться от оперирования магнитными массами не представляется целесообразным, так как в отдельных случаях величины, характеризующие магнитное поле в том виде, как мы ими пользуемся в настоящее время, наиболее просто могут быть определены именно через посредство понятия о магнитных массах.

На основании опытов с намагниченными длинными стержнями Кулон установил следующий закон механического взаимодействия магнитных масс, связанных с полюсами магнитов:

$$f = k\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Здесь через m_1 и m_2 обозначены магнитные массы, которые рассматриваются как сосредоточенные на весьма малых участках поверхности полюсов. Далее, r есть расстояние между этими магнитными массами m_1 и m_2, f — сила их механического взаимодействия, а k — множитель, зависящий от свойств окружающей полюсы однородной среды и от выбора системы единиц.

Итак, механическая сила взаимодействия двух точечных магнитных масс в однородной среде прямо пропорциональна произведению этих масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Эта сила направлена вдоль прямой, соединяющей точки, в которых мы предполагаем расположенными взаимодействующие магнитные массы.

Соответственно северным и южным полюсам и гипотетические магнитные массы могут быть северными и южными, причем северные, как известно, условно считаются положительными, а южные — отрицательными. В связи с этим силе взаимодействия одноименных магнитных масс, т. е. силе их отталкивания, приписывается положительное значение, а силе взаимодействия разноименных магнитных масс, т. е. силе их притяжения, приписывается отрицательное значение.

Что касается коэффициента пропорциональности k, то для случая однородной и изотропной среды в настоящее время принято:

$$k = \frac{1}{4\pi\mu}.$$

Величина μ, характеризующая степень участия среды в магнитных взаимодействиях, как известно, называется *магнитной проницаемостью*. Происхождение этого термина тесно связано с представлением о проникновении магнитного потока сквозь всякого рода материальную среду и всевозможные тела.

Множитель 4π в знаменателе выражения, определяющего коэффициент пропорциональности k, вводится в соответствии с принятой

[1] См. также § 24 Главы III, где речь идет о количественных соотношениях, связывающих величину гипотетических магнитных масс с условиями распределения магнитного потока.

в настоящее время *рационализированной системой единиц*, относящихся к области электротехники. Внесение 4π в формулировку закона Кулона, как указал еще Хевисайд, имеет совершенно определенный физический смысл. При этом множитель 4π исчезает в целом ряде соотношений, часто встречающихся в учении о магнитизме и электричестве, вследствие чего указанные соотношения приобретают более простой вид.

Таким образом, закон Кулона в рационализированной форме выражается так:

$$f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{4\pi r^2}.$$

До установления же в области электротехники рационализированной системы единиц закон Кулона в кассической литературе обычно формулировался в следующем виде:

$$f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Магнитную проницаемость „пустоты“ (эфира) принято обозначать через μ_0. Эта величина μ_0 на основании международного соглашения установлена в качестве четвертого эталона в электромагнитной системе единиц. В связи с этим абсолютная электромагнитная система, базирующаяся на сантиметре, грамме и секунде, сокращенно обозначается через $\mathrm{CGS}\,\mu_0$. Рационализированную же электромагнитную систему единиц, одобренную Международной электротехнической комиссией в 1935 г. и базирующуюся на метре, килограмме и секунде, обозначают через $\mathrm{MKS}\,\mu_0$.

В нерационализированной системе $\mathrm{CGS}\,\mu_0$ для случая „пустоты“ (эфира) соотношение, выражающее закон Кулона, имеет такой вид:

$$f = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

При этом для величины μ_0 в системе $\mathrm{CGS}\,\mu_0$ было принято численное значение, равное единице.

Переход к рационализированной системе $\mathrm{MKS}\,\mu_0$ по существу связан с установлением для этой же величины μ_0 следующего значения:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ единиц } \mathrm{MKS}\mu_0.$$

Такой выбор значения μ_0 в системе $\mathrm{MKS}\,\mu_0$ определяется требованием, чтобы в качестве единицы электродвижущей силы получался вольт, в качестве единицы силы тока — ампер и т. д., т. е. чтобы сохранились единицы, которыми мы обычно пользуемся на практике.

Что касается единицы магнитной массы, то, как известно, она устанавливается, именно исходя из данного Кулоном закона механического взаимодействия магнитных масс.

§ 11. Магнитная сила. Кулоновское определение

а. Механическое воздействие магнитного поля на полюсы магнита, с которыми мы условно ассоциируем якобы расположенные на них магнитные массы, может быть использовано для обследования поля. Чем данное поле сильнее, тем больше механическая сила, действующая

на магнитный полюс. Таким образом, величина этой силы, приложенной к некоторому определенному полюсу (можем назвать его пробным полюсом), позволяет судить об интенсивности магнитного процесса, который происходит в том или ином участке поля, где именно помещен пробный полюс.

Магнитной силой называют отношение механической силы f, с которой магнитное поле действовало бы в „пустоте" (в эфире) на северную, т. е. положительную, магнитную массу m, помещенную в рассматриваемой точке поля, к величине этой магнитной массы m. Предполагается, что внесение данной магнитной массы не изменяет общих условий, от которых зависит магнитное поле. Обозначая магнитную силу через H, мы можем на основании указанного определения написать

$$H = \frac{f}{m}.$$

Ясно, следовательно, что магнитная сила H в любой точке поля численно равна механической силе, действующей на единицу северной магнитной массы.

Направление магнитной силы H принимается совпадающим с направлением механической силы f. Магнитная сила есть вектор.

В § 8 мы обозначили через B_0 магнитную индукцию в „пустоте" (в эфире) и рассматривали эту величину в качестве характеристики основного магнитного процесса, происходящего в эфире. Магнитная сила H по существу представляет собой вторую характеристику того же основного процесса, т. е. выражает собою то же самое, но только в других единицах. Очевидно, что B_0 и H прямо пропорциональны одно другому и в связи с этим мы пишем

$$B_0 = \mu_0 H,$$

где μ_0 есть магнитная проницаемость „пустоты" (эфира). Выбор единиц для измерения B и H так согласован, чтобы коэффициент связи между ними был именно равен величине магнитной проницаемости. В системе CGS μ_0, в которой принимается

$$\mu_0 = 1,$$

B_0 и H численно равны, т. е.

$$|B_0| = |H|.$$

Вышеприведенное определение магнитной силы имеет совершенно общий характер. Во избежание недоразумений в отдельных частных случаях необходимо иметь в виду следующее. Данное определение H безоговорочно применимо в „пустоте". Во всех других случаях надо прежде всего помнить, что магнитные массы должны быть выражены в единицах, определяемых соответственно взаимодействиям в „пустоте" (в эфире). Если мы рассматриваем магнитную массу в объеме, заполненном каким-либо веществом, то для определения численного значения этой магнитной массы и соответствующей величины магнитной силы необходимо представить себе данную магнитную массу как бы находящейся в „пустоте". При соблюдении этого условия основное определение в полной мере применимо к случаю любой однородной среды. В случае же среды неоднородной, например, если мы имеем железный стержень, помещенный в магнитном поле, и желаем определить H в какой-либо точке внутри железа, обыкновенно сводят дело к определению H

в „пустоте“ в некоторых эквивалентных условиях. Именно, представляют себе внутри железа беспредельно тонкую нитевидную выемку ограниченной длины (в классической литературе подобная выемка именуется „пещеркой первого рода“), причем предполагается, что эта выемка расположена таким образом, чтобы „наведенная“ на ее внутренней поверхности магнитная масса была бесконечно мала. Под магнитной силой H в железе в данной точке разумеют магнитную силу внутри указанной воображаемой нитевидной пещерки, так образованной, чтобы рассматриваемая точка оказалась в пустоте, внутри пещерки. Таким образом, можно сказать, что магнитная сила в некоторой точке в общем случае какой угодно среды численно равна той механической силе, которая действовала бы в этой точке на единицу северной магнитной массы, если бы обычное вещество было изъято из магнитного поля, но все магнитные массы как якобы образующие основное поле, так и „наведенные“ на поверхности железа и других материалов, сохранились полностью.

Данное здесь определение магнитной силы мы можем назвать *кулоновским* в том смысле, что, хотя оно и не было сформулировано самим Кулоном, но непосредственно вытекает из представлений, введенных в науку Кулоном. В ряде случаев, именно когда магнитное поле связано с наличием разного рода магнитных систем, т. е. связано с существованием магнитных полюсов, магнитная сила может быть вычислена, исходя из закона Кулона, который позволяет подвергнуть математическому анализу механические взаимодействия в сколь угодно сложной совокупности магнитных полюсов.

6. В нерационализированной системе CGS μ_0 единица магнитной силы получила название *эрстед*. Как было уже указано выше, в случае „пустоты“ (эфира) имеет место следующее соотношение:

$$B_0 = \mu_0 H.$$

Единица магнитной индукции, гаусс, и единица магнитной силы, эрстед, так согласованы между собой, что в случае „пустоты“ (эфира) одному гауссу соответствует один эрстед в связи с тем, что в рассматриваемой системе CGS μ_0 принято:

$$\mu_0 = 1.$$

Таким образом, можно написать:

$$1 \text{ гаусс} = \mu_0 \cdot 1 \text{ эрстед}.$$

Аналогичное соотношение между магнитной индукцией и магнитной силой принимается и для случая какой угодно среды, и мы пишем

$$B = \mu H,$$

где μ есть магнитная проницаемость среды, численно отличающаяся от μ_0. В то время как в „пустоте“ (эфире) магнитная индукция, выраженная в гауссах, численно равна магнитной силе, выраженной в эрстедах, в случае обычного вещества эти же величины (B и H), вообще говоря, численно отличаются одна от другой.

Из приведенных выше соотношений следует

$$H=\frac{1}{\mu_0}B_0,$$

$$B=\frac{\mu}{\mu_0}B_0=\mu' B_0.$$

Здесь через μ' обозначено число, равное отношению магнитной проницаемости некоторого вещества к магнитной проницаемости „пустоты" (эфира) и, следовательно, совершенно не зависящее от выбора системы единиц. Это число μ', называемое *относительной магнитной проницаемостью* вещества, показывает, во сколько раз магнитная индукция в данном веществе больше магнитной индукции в „пустоте" (эфире), при прочих равных условиях.

Сопоставляя соотношение

$$B=\mu' B_0$$

с приведенным в § 8 соотношением

$$B=B_0+\Delta B,$$

мы заключаем, что оба эти соотношения эквивалентны одно другому, но лишь в разной форме выражают участие вещества в магнитном процессе. Во втором соотношении в явном виде фигурирует добавочная магнитная индукция, привносимая веществом в результирующий магнитный процесс; первое же соотношение дает общую связь результирующей магнитной индукции B с основной магнитной индукцией B_0 через численный коэффициент μ'.

в. Подобно тому как мы строили линии магнитной индукции, можно провести в магнитном поле ряд линий, обладающих тем свойством, что во всех точках этих линий направление касательных к ним совпадает с направлением магнитной силы H. Такие линии принято называть *силовыми линиями* магнитного поля. Положительное направление их определяется направлением вектора магнитной силы.

Ясно, конечно, что ни в коем случае не следует отожествлять силовые линии магнитного поля с элементарными или с единичными магнитными линиями, определяемыми так, как это было сделано в § 9.

В среде однородной и изотропной линии магнитной индукции и силовые линии совпадают, так как в данном случае векторы B и H имеют одно и то же направление. В среде же однородной, но анизотропной, векторы B и H имеют, вообще говоря, различное направление и соответственно этому линии магнитной индукции и силовые линии образуют две самостоятельные системы кривых, не сливающиеся одна с другой. В случае неоднородной среды, например, когда в магнитном поле размещены ферромагнитные тела, на которых якобы „наводятся" магнитные массы, обе системы линий (B и H) сильно отличаются одна от другой по существу. В этом отношении указанное различие особенно велико в случае магнитного поля постоянных магнитов. Дело в том, что силовые линии начинаются на положительных (северных) магнитных массах и заканчиваются на отрицательных (южных) магнитных массах. Следовательно, силовые линии магнитного поля могут быть прерывны, в то время как линии магнитной индукции всегда образуют принципиально замкнутые контуры. В частном случае пространства внутри

постоянного магнита направления силовых линий и линий магнитной индукции прямо противоположны. Именно, силовые линии направлены от северного полюса к южному, а линии магнитной индукции внутри магнита направлены от южного полюса к северному.

г. В заключение настоящего параграфа будет уместно несколько остановиться на вопросах терминологии. Дело в том, что кроме термина „магнитная сила" для наименования той же величины H начал входить в употребление термин „напряженность магнитного поля". Термин „магнитная сила" широко распространен в классической литературе. Кельвин, Максвелл, Хевисайд, Дж. Дж. Томсон, Гаусс, Вебер, Герц, Друде, Боргман, Хвольсон и многие другие ученые пользовались этим именно термином для наименования величины H. И в настоящее время термин „магнитная сила" продолжает применяться в научной и технической литературе на равных правах с указанным термином „напряженность магнитного поля". Естественно возникает вопрос о целесообразности сохранения единого термина для наименования величины H.

По данному поводу можно сказать следующее. Во-первых, термин „магнитная сила" является более старым термином, давно уже вошедшим в употребление и никогда не дававшим повода для недоразумений. Во-вторых, с термином „магнитная сила" более согласуются некоторые другие привычные термины или выражения. Так, например, очень распространен термин „силовые линии магнитного поля" и вместе с тем совсем не пользуются термином „линии напряженности магнитного поля". Мы часто говорим „более сильное магнитное поле" или „менее сильное магнитное поле", но никогда не говорим „более напряженное магнитное поле" или „менее напряженное магнитное поле". К той же категории доводов в пользу термина „магнитная сила" можно отнести и следующее указание. Очень распространен термин „коэрцитивная сила" для обозначения величины H в некоторых специальных случаях (из области учения о ферромагнитных материалах). Ради последовательности, при исключении термина „магнитная сила", необходимо было бы ввести новый термин „коэрцитивная напряженность". Однако мало вероятно, чтобы этот новый термин нашел себе применение в соответствующей литературе. В-третьих, термин „напряженность" созвучен с термином „напряжение", применяемым в смысле разности потенциала (магнитной или электрической), и это обстоятельство может иногда повести к недоразумениям. Кроме того, следует считаться и с термином „напряженность намагничения", который применялся и изредка еще применяется для обозначения величины, чаще всего теперь называемой „интенсивностью намагничения."

В связи с вышеуказанными соображениями в настоящей книге отдается предпочтение старому термину „магнитная сила".

§ 12. Интенсивность намагничения

В § 8 мы вкратце коснулись физического смысла соотношения

$$B = B_0 + \Delta B,$$

где через B_0 обозначается магнитная индукция в „пустоте" (в эфире), характеризующая основной магнитный процесс в рассматриваемой точке поля, ΔB представляет собой то добавление к B_0, которое привносится наличием вещества, подвергающегося воздействию магнитного поля, а B есть результирующая магнитная индукция.

Мы уже указывали, что всякое обычное вещество, будучи помещено в магнитном поле, принимает активное участие в происходящих в данном поле процессах. В связи с этим и в зависимости от магнитных свойств вещества наблюдаются бо́льшие или меньшие изменения в распределении магнитного потока, и плотность его, т. е. магнитная индукция B, приобретает значения, отличающиеся от B_0. В случае веществ парамагнитных (особенно сильно это проявляется в веществах ферромагнитных) всегда получается

$$B > B_0.$$

В этом случае ΔB имеет положительное значение.

В случае же веществ диамагнитных ΔB имеет отрицательное значение и соответственно получаем

$$B < B_0.$$

При изучении магнитного состояния вещества обычно называют величину ΔB *интенсивностью намагничения* (или напряженностью намагничения) данного вещества и для обозначения ее применяют букву I. Таким образом, можно написать

$$\Delta B = I.$$

Вектор интенсивности намагничения I в случае среды однородной и изотропной совпадает с направлением вектора магнитной силы H.

Хотя, как только что было указано, физическая величина I по существу теснейшим образом связана с представлением о магнитном потоке, однако до последнего времени при формальном рассмотрении магнитных свойств различных материалов принято, в силу причин чисто исторического характера, определять интенсивность намагничения I как магнитный момент, отнесенный к единице объема того или иного вещества. Под магнитным же моментом, в случае рассмотрения суммарного эффекта элементарных электромагнитных процессов внутри вещества, как известно, разумеют произведение воображаемой северной магнитной массы, расположенной на одном из полюсов магнитного диполя, на расстояние между полюсами. (При этом необходимо предполагать, что диполь расположен в „пустоте", т. е. что к определению величины магнитных масс относятся все разъяснения, сделанные по данному поводу в предыдущем § 11.) Оба указанных определения величины I — одно, вытекающее из представления о физически существующем магнитном потоке, и другое, основанное на оперировании с фиктивными магнитными массами, — математически вполне эквивалентны.

Отношение интенсивности намагничения к соответствующей магнитной силе принято называть *магнитной восприимчивостью* и обозначать это отношение буквой $\varkappa$. В связи со сказанным можно написать

$$\frac{I}{H} = \varkappa$$

и

$$I = \varkappa H.$$

Итак, на основании всего вышеизложенного, пользуясь рационализированной системой единиц, имеем

$$B = B_0 + I.$$

Принимая во внимание соотношения, связывающие B_0 и I с магнитной силой H, получаем

$$B = \mu_0 H + \varkappa H.$$

Разделяя обе части этого равенства на H, приходим к следующему соотношению между характеристическими величинами μ, μ_0 и $\varkappa$:

$$\mu = \mu_0 + \varkappa.$$

В случае отсутствия в магнитном поле какого-либо обычного вещества, мы имеем

$$B = B_0$$

и

$$\mu = \mu_0.$$

Следовательно, для „пустоты" (эфира)

$$I = 0$$

и

$$\varkappa = 0.$$

Для диамагнитных веществ

$$\varkappa < 0$$

и в соответствии с этим

$$\mu < \mu_0.$$

Для веществ парамагнитных

$$\varkappa > 0$$

и

$$\mu > \mu_0.$$

Все вышеприведенные соотношения применимы без каких бы то ни было оговорок в тех случаях, когда магнитная проницаемость среды может быть рассматриваема в качестве величины неизменяющейся, т. е. когда можно положить

$$\mu = \text{Const.}$$

и соответственно

$$\varkappa = \text{Const.}$$

В случае же ферромагнитных материалов, как известно, нельзя говорить о постоянстве магнитной проницаемости, в связи с большой сложностью происходящих в них элементарных электромагнитных процессов. И само это понятие магнитной проницаемости может применяться к ферромагнитным материалам лишь при соблюдении некоторых строго определенных условий. Вообще же могут быть случаи, когда понятия магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости теряют всякий смысл. Так, в некоторых стадиях намагничивания ферромагнитного вещества, например железа и стали, B и I могут быть больше нуля при магнитной силе H, равной нулю и даже при отрицательном значении H.

§ 13. Теорема Гаусса

Рассмотрим прежде всего пространство, в котором нет обычного вещества, т. е. остановимся на случае „пустоты“ (эфира). Предположим, что магнитная масса m окружена со всех сторон некоторой замкнутой поверхностью S, имеющей произвольную форму. В любой точке данной поверхности магнитная сила H, обусловленная наличием магнитной массы m, может быть определена на основании закона Кулона. Именно, в рационализированной системе единиц H определяется так:

$$H=\frac{1}{\mu_0}\cdot\frac{m}{4\pi r^2},$$

где r есть расстояние между магнитной массой m и рассматриваемым элементом поверхности, который обозначим через ds.

Так называемый поток вектора H сквозь элемент поверхности ds выражается следующим образом:

$$H\cos\alpha\, ds=\frac{1}{\mu_0}\cdot\frac{m}{4\pi r^2}\cos\alpha\, ds,$$

где α есть угол между вектором H и внешней нормалью к поверхности в месте расположения элемента ds.

Интегрируя данное выражение по всей замкнутой поверхности S, как известно, получаем

$$\oint_S H\cos\alpha\, ds=\frac{1}{\mu_0}\cdot m.$$

Это есть формулировка теоремы Гаусса для случая „пустоты“ (эфира). Ясно, конечно, что под m мы можем подразумевать алгебраическую сумму всех магнитных масс, находящихся внутри данной замкнутой поверхности S, так как можем рассмотреть по очереди все отдельные массы так, как будто бы каждая из них существует только одна, и приложить к каждой из них теорему Гаусса, а затем всё сложить. Тогда под знаком интеграла получим нормальную составляющую результирующей магнитной силы, а в правой части будет сумма всех магнитных масс, т. е. Σm.

В случае если пространство заполнено какой-либо неоднородной средой, например если в магнитном поле размещены постоянные магниты, части из железа и т. п., в полной мере применима формулировка теоремы Гаусса, данная для „пустоты“ (эфира) при условии такого определения магнитной силы H, как это было разъяснено в § 11 применительно к самому общему случаю.

Если пространство заполнено однородным и изотропным веществом с постоянной магнитной проницаемостью μ, то для любой точки замкнутой поверхности можем написать

$$H=\frac{1}{\mu}\cdot\frac{m}{4\pi r^2},$$

и теорема Гаусса для этого случая может быть сформулирована в следующем виде:

$$\oint_S H\cos\alpha\, ds=\frac{1}{\mu}\cdot m.$$

При этом по существу игнорируются те дополнительные магнитные массы, которые „наводятся" на границе соприкосновения среды и полюсов, несущих на себе основные магнитные массы, принимаемые во внимание в только что приведенной формулировке теоремы Гаусса. Введением в правой части равенства магнитной проницаемости μ, собственно говоря, достигается тот же результат, как если бы мы представили себе, что данное однородное вещество отсутствует, но все магнитные массы, *в том числе и „наведенные"* сохранились полностью.

Так как в рассматриваемом случае магнитная проницаемость μ есть величина постоянная согласно условию, то можем написать

$$\oint_s \mu H \cos \alpha \, ds = m,$$

или

$$\oint_s B \cos \alpha \, ds = m.$$

Из последнего соотношения следует, что понятие фиктивной магнитной массы, условно вводимое при рассмотрении магнитных явлений, имеет связь с представлением о магнитном потоке. Действительно, интеграл, стоящий в левой части этого соотношения, представляет собою не что иное, как поток вектора магнитной индукции, т. е. магнитный поток, пронизывающий замкнутую поверхность S и якобы исходящий из магнитной массы m или заканчивающийся на ней. Иными словами, физический смысл понятия магнитной массы заключается в том, что она является условным центром истока или стока магнитных линий. При этом в рационализированной системе единиц численная величина магнитной массы как раз равна магнитному потоку, условно ассоциируемому с этой магнитной массой, т. е.

$$\Phi = \oint_s B \cos \alpha \, ds = m.$$

Мы знаем, однако, что никаких магнитных масс в действительности не существует и что линии магнитной индукции непрерывны, т. е. всегда образуют замкнутые контуры (§ 17 Главы III). Следовательно, каждая магнитная линия может пересекать некоторую замкнутую поверхность обязательно четное число раз. Сколько магнитных линий входит внутрь замкнутой поверхности, столько же и выходит из нее. Иными словами, магнитный поток пронизывает отдельные участки рассматриваемой поверхности, входя внутрь объема, ограниченного ею, и точно такой же магнитный поток пронизывает другие участки этой замкнутой поверхности в направлении изнутри наружу. В действительности *полный* магнитный поток, пронизывающий любую замкнутую поверхность, всегда и безусловно всегда равен нулю, т. е.

$$\oint_s B \cos \alpha \, ds = 0.$$

Всё это находится в соответствии с тем, что в природе не существует изолированных магнитных полюсов какого-либо одного только знака. Всякий магнитный полюс принципиально сопряжен с полюсом другого знака и точно такой же интенсивности. Магнитные массы, которые мы приписываем этим сопряженным полюсом, противоположны по знаку и обязательно равны одна другой по абсолютной величине.

Итак, *лишь совершенно условно* при формальном оперировании с магнитной массой мы можем рассматривать ее в качестве изолированного источника магнитного потока, причем в рационализированной системе единиц этот магнитный поток равен соответствующей магнитной массе.

§ 14. Магнитодвижущая сила. Электромагнитное определение магнитной силы и силы тока

а. Определение магнитной силы, которое мы назвали кулоновским, вытекает непосредственно из изучения механических взаимодействий магнитных полюсов. Возможно, однако, связать представление о магнитной силе с другими явлениями, именно с явлениями из области электромагнитизма. Как известно, простейший и вместе с тем основной электромагнитный процесс, существующий в природе, воспринимается нами в форме так называемого электрического тока. В данном случае мы встречаемся с двумя теснейшим образом сопряженными сторонами единого электромагнитного комплекса, которые порознь исследуются обычно в качестве электрических и магнитных процессов. В дальнейшем (см. Главу VI) будет уделено внимание специальному рассмотрению вопроса о том, что по существу представляет собой электрический ток. Здесь же мы ограничимся только указанием, что с электрическим током всегда связан магнитный поток, который принято называть потоком самоиндукции. Иными словами, в пространстве, окружающем всякий электрический ток, наблюдается магнитное поле. Магнитную силу этого поля можно, как оказывается, весьма просто связать с основной характеристикой электрического тока, т. е. с силой данного тока.

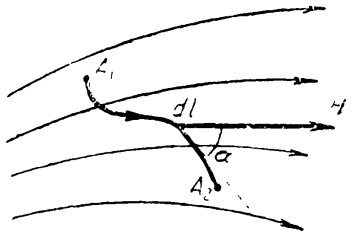


Рис. 3.

б. Представим себе в магнитном поле некоторый путь перехода из точки A_1 в точку A_2 (рис. 3). Составим выражение

$$H\cos\alpha\, dl,$$

где dl есть элементарное перемещение вдоль рассматриваемого пути перехода, H — магнитная сила в месте расположения элемента dl, а α — угол между направлениями H и dl.

Величина механической силы, действующей на единицу положительной (северной) магнитной массы, находящуюся в данной точке поля, численно равна H, и, следовательно, составляющая этой механической силы по направлению элементарного перемещения dl численно будет равна $H\cos\alpha$. Поэтому произведение $H\cos\alpha\, dl$ дает нам численное значение работы, совершаемой силами магнитного поля при элементарном перемещении единицы магнитной массы. Интеграл от этого выражения, взятый вдоль конечного отрезка некоторой линии (например $A_1 A_2$), т. е.

$$\int_{A_1}^{A_2} H\cos\alpha\, dl,$$

численно равен работе, совершаемой при таком конечном перемещении единицы северной магнитной массы. Этот линейный интеграл магнитной

силы, как известно, называется разностью магнитных потенциалов точек A_1 и A_2 или *магнитодвижущей силой*, действующей на рассматриваемом пути перехода от точки A_1 до точки A_2, и обозначается буквой F.

Нас сейчас интересует величина линейного интеграла магнитной силы в одном частном случае, именно когда линия, вдоль которой мы берем этот интеграл, представляет собою замкнутый контур. Значение величины интеграла

$$\oint H\cos\alpha\, dl$$

в случае магнитного поля тока облегчает описание и расчет магнитных цепей и вместе с тем позволяет сформулировать второе определение магнитной силы, которое мы можем назвать *электромагнитным* в отличие от первого, кулоновского определения.

Обследование данного вопроса показывает, что величина

$$\oint H\cos\alpha\, dl$$

зависит только от силы тока, сцепляющегося с данным контуром интегрирования. Можно доказать, что безусловно всегда имеет место соотношение:

$$F=\oint H\cos\alpha\, dl=i,$$

где i есть сила тока, сцепляющегося с замкнутым контуром интегрирования. В общем случае под i подразумевается *полная сила тока*, т. е. алгебраическая сумма всех токов, проходящих сквозь замкнутый контур интегрирования. Только что написанное соотношение принято называть *законом магнитодвижущей силы*.

Если $i=0$, то

$$\oint H\cos\alpha\, dl=0,$$

т. е. работа, совершаемая силами магнитного поля при перемещении единицы магнитной массы по замкнутому контуру, равна нулю, если этот контур не сцепляется ни с каким током.

Итак, величина линейного интеграла

$$\oint H\cos\alpha\, dl$$

является мерою силы тока, сцепляющегося с контуром интегрирования, и обратно, через силу электрического тока мы можем выразить величину магнитной силы в пространстве, окружающем ток.

в. Можно было бы не останавливаться на доказательстве справедливости соотношения, выражающего закон магнитодвижущей силы, так как это доказательство дается в соответствующих курсах. Целесообразно, однако, вкратце коснуться общей схемы связанных с этим рассуждений, потому что в них очень наглядно демонстрируется формальная простота, достигаемая при закономерном использовании представления о магнитной массе как об условном источнике магнитного потока. Сущность указанных рассуждений сводится к рассмотрению работы, совершаемой

при пересечении магнитных линий контуром тока во время движения магнитной массы вдоль какого-либо замкнутого контура, сцепляющегося с этим током (рис. 4). Мы знаем уже, что положительную (северную) магнитную массу m условно можно считать источником магнитного потока (пунктир на рис. 4), величина которого определяется соотношением

$$\Phi = m.$$

Нетрудно видеть, что за время перемещения магнитной массы m вдоль замкнутого контура (сплошная линия на рис. 4) от некоторого начального положения и до этого же положения, т. е. за время одного полного обхода вдоль рассматриваемого контура, весь исходящий из магнитной массы поток один раз пересечется контуром тока i. Процесс пересечения магнитных линий проводником электрической цепи будет сопровождаться индуктированием электродвижущей силы в этом проводнике. Допустим, что движение магнитной массы m совершается по замкнутому контуру, как указано на рис. 4 соответствующею стрелкою, т. е. в направлении, которое является положительным по отношению к принятому направлению тока. В таком случае индуктированная электродвижущая сила будет действовать против тока i, который, преодолевая ее, совершит работу перемещения магнитной массы m за счет источника электрической энергии, поддерживающего неизменным ток i. Эта электромагнитная работа выразится так:

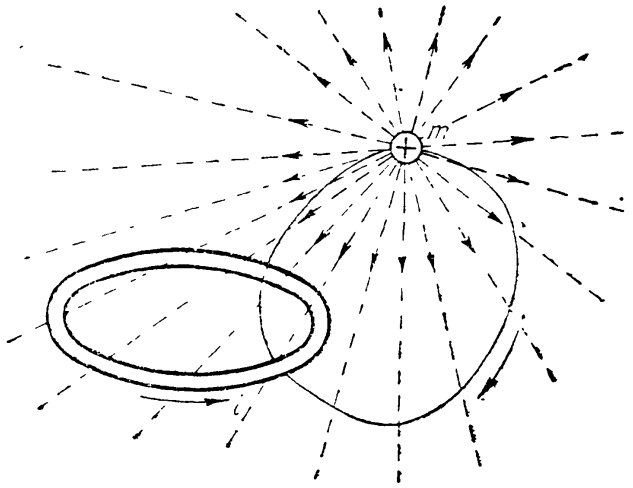


Рис. 4.

$$A = \int_0^t \frac{d\Phi}{dt}\, i\, dt = \int_0^{\Phi} i\, d\Phi = \Phi i = mi,$$

где пределы интегрирования соответствуют времени полного обхода магнитной массы m.

С другой стороны, та же работа перемещения магнитной массы m равняется произведению m и $\oint H\cos\alpha\, dl$, т. е.

$$A = m \oint H\cos\alpha\, dl.$$

Сопоставляя оба указанных выражения для A, можем написать

$$m \oint H\cos\alpha\, dl = mi,$$

откуда получаем

$$\oint H\cos\alpha\, dl = i,$$

что и требовалось доказать.

В случае же, если контур интегрирования не сцепляется с контуром тока, магнитный поток, исходящий из магнитной массы m лишь частично пересекается проводником и притом пересечения происходят то в одном, то в другом направлении, так что алгебраическая сумма всех пересечений магнитного потока оказывается равной нулю. Следовательно, в этом случае всегда и неизменно получается

$$\oint H \cos\alpha \, dl = 0.$$

г. Из закона магнитодвижущей силы

$$F = \oint H \cos\alpha \, dl = i$$

следует, что единицею магнитодвижущей силы является единица силы тока, т. е. ампер.

Если контур интегрирования совпадает с некоторою силовой линией магнитного поля тока, то $\cos\alpha = 1$ и можно написать

$$F = \oint H \, dl = i,$$

откуда следует

$$H = \frac{dF}{dl} = \frac{di}{dl}.$$

Последнее соотношение представляет собой математическую формулировку *электромагнитного определения магнитной силы*. Таким образом, магнитная сила численно равна магнитодвижущей силе, приходящейся на единицу длины соответствующей силовой линии, или, иными словами, силе электрического тока, возбуждающего магнитный поток и рассчитанного на единицу длины магнитной цепи.

В рационализированной системе MKS μ_0 единицей магнитной силы является *ампер на метр*. Выше мы указывали, что в нерационализированной системе CGS μ_0 за единицу магнитной силы принимается эрстед. Соотношение между этими единицами может быть получено на основании равенства

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

В системе MKS μ_0 единица магнитной проницаемости, которую предложено называть *юингом*, в $\frac{10^7}{4\pi}$ раз больше единицы магнитной проницаемости в системе CGS μ_0. Отсюда вытекает

$$1\ \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} = \frac{1\ \frac{Wb}{m^2}}{1\ \text{ewing}} = \frac{10^4\ \mathrm{Gs}}{\frac{10^7}{4\pi}\ \text{единиц CGS}\ \mu_0} = 4\pi \cdot 10^{-3}\ \mathrm{Oe}.$$

В электротехнических расчетах часто пользуются единицей магнитной силы, равной *амперу на сантиметр*, причем обычно называют ее *ампер-витком на сантиметр*. Это связано с тем, что полный ток, рассматри-

ваемый при расчетах магнитных цепей, принято выражать в ампервитках. Ясно, конечно, что имеют место следующие соотношения:

$$1\,\frac{\text{A}}{\text{m}} = \frac{1}{100}\,\frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

и

$$1\,\frac{\text{A}}{\text{cm}} = 100\,\frac{\text{A}}{\text{m}} = 0.4\pi\ \text{Oe}.$$

д. Мы подошли к электромагнитному определению магнитной силы, пользуясь представлением о магнитной массе. Однако возможно было бы поступить и иначе. Исходя из того, что всякий электрический ток принципиально связан с соответствующим магнитным полем и применяя метод пробной катушки (см. § 7), мы могли бы прежде всего установить полную пропорциональность, существующую между B_0 — магнитной индукцией в „пустоте" (в эфире) — и силою тока i. Отсюда мыслимо получить электромагнитное определение магнитной силы H, к рассмотрению которой мы, отдавая дань установившейся традиции, подошли было другим путем, а именно путем оперирования с чисто механическими проявлениями магнитного поля. Закон магнитодвижущей силы оказался бы тогда простым следствием электромагнитного определения магнитной силы. Таким образом, при построении системы основных представлений, которыми мы в настоящее время пользуемся при описании и исследовании всех магнитных явлений, можно было бы совершенно обойти фиктивные магнитные массы.

Однако необходимо считаться с некоторыми обстоятельствами, дававшими повод остановиться сначала на кулоновском определении магнитной силы. Это было сделано с той целью, чтобы иметь возможность коснуться системы единиц CGSμ_0, как важного исторического этапа, приведшего в конце концов к более совершенной системе MKSμ_0. Вместе с тем мы стремились связать условное представление о магнитной массе с представлением о реально существующем магнитном потоке и показать, что закономерное использование понятия магнитной массы во всяком случае приводит к правильным окончательным результатам.

е. Следует еще отметить важное значение закона магнитодвижущей силы в одном отношении. Дело в следующем. Общепринятое определение силы тока гласит:

$$i = \frac{dq}{dt},$$

где q есть количество электричества, протекающего через поперечное сечение цепи тока. Иными словами, сила тока рассматривается в качестве скорости протекания электричества по проводнику.

На основании же закона магнитодвижущей силы мы можем написать

$$i = \oint H \cos\alpha\, dl.$$

Таким образом, сила тока равна его магнитодвижущей силе, т. е. равна линейному интегралу магнитной силы вдоль замкнутого контура, сцепляющегося с данным током.

Это есть *электромагнитное определение силы тока, по существу совершенно не связанное с обычным представлением о движущемся электричестве.*

§ 15. Закон магнитной цепи

а. Как известно, путь, вдоль которого проходит и замыкается магнитный поток, принято называть магнитной цепью. В области электротехники при расчете всякого рода электромагнитных механизмов играет важную роль *закон магнитной цепи*, позволяющий производить необходимые вычисления, касающиеся величины магнитного потока. Закон этот представляет собой соотношение между магнитным потоком, магнитодвижущей силой, действующей вдоль данной магнитной цепи, ее геометрическими размерами и магнитной проницаемостью среды на различных участках магнитной цепи.

Из всех соотношений, при помощи которых принято описывать процессы, происходящие в магнитном поле, закон магнитной цепи особенно тесно связан с представлением о магнитном потоке и с наиболее важным свойством этого потока, а именно с принципиальной замкнутостью всех составляющих его магнитных линий. Не будет каким-либо преувеличением утверждение, что рассматриваемый закон может быть выражен только в терминах, вытекающих из общих идей Фарадея о магнитном поле. В противном случае закон магнитной цепи являлся бы совершенно бессодержательным соотношением, физический смысл которого было бы весьма затруднительно интерпретировать. Помимо большой практической ценности, этот закон имеет глубокое значение для правильного понимания общего характера магнитных явлений.

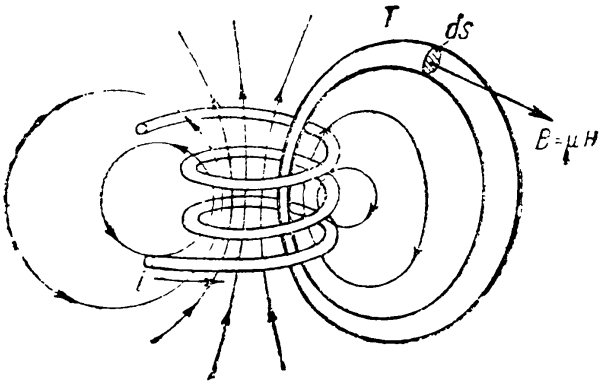


Рис. 5.

По своей форме закон магнитной цепи подобен закону Ома. Оба закона просто выражаются в точной форме лишь для случая *линейных* цепей, поперечные размеры которых весьма малы по сравнению с длиной цепи.

б. Остановимся на выводе точной формулировки закона магнитной цепи. Рассмотрим контур тока произвольной формы, например катушку, состоящую из w витков (рис. 5), по которым протекает ток i. Выделим в магнитном поле тока трубку магнитной индукции столь малых поперечных размеров, чтобы для всех точек какого-либо нормального сечения этой трубки можно было считать величину магнитной силы H одной и той же. В пределе можем говорить о бесконечно тонкой трубке магнитной индукции. Магнитодвижущая сила, действующая вдоль оси трубки, будет (см. § 14)

$$F=\oint H\cos\alpha\, dl=\oint H\, dl=i_0,$$

где i_0 есть полный ток, сцепляющийся с данной трубкой магнитной индукции. Ясно, конечно, что

$$i_0=wi.$$

Следовательно

$$F=\oint H\, dl=wi.$$

Магнитный поток, проходящий сквозь какое-либо нормальное сечение данной бесконечно тонкой трубки магнитной индукции, равен

$$d\Phi = Bds = \mu Hds.$$

Отсюда вытекает

$$H = \frac{d\Phi}{\mu ds}.$$

Подставляя это значение H в выражение для магнитодвижущей силы, имеем

$$\oint \frac{d\Phi}{\mu ds} dl = wi.$$

Поток $d\Phi$ сохраняет постоянное значение вдоль всей трубки магнитной индукции. Поэтому его можно вынести за знак интеграла. Находим

$$d\Phi \oint \frac{dl}{\mu ds} = wi,$$

откуда окончательно получаем

$$d\Phi = \frac{wi}{\oint \frac{dl}{\mu ds}}.$$

Это выражение и представляет собой совершенно точную формулировку закона магнитной цепи.

Исходя именно из аналогии с законом Ома числитель $wi = F$ принято называть *магнитодвижущей силой*, а знаменатель

$$\oint \frac{dl}{\mu ds} = R_m$$

называется *магнитным сопротивлением*. Таким образом, закон магнитной цепи можно сокращенно представить в следующем виде:

$$d\Phi = \frac{F}{R_m}.$$

в. С большой степенью точности закон магнитной цепи может быть применен и к трубке магнитной индукции конечного сечения s при условии, что линейные размеры этого сечения малы по сравнению с длиной трубки. Практически подобная трубка может рассматриваться в качестве линейной магнитной цепи. Магнитный поток в этой трубке будет иметь конечное значение так же, как конечным будет и магнитное сопротивление трубки. В рассматриваемом случае можем написать

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{wi}{\oint \frac{dl}{\mu s}}.$$

В том простейшем случае, когда величины μ и s постоянны вдоль всей трубки магнитной индукции, получаем

$$\Phi = \frac{wi}{\frac{l}{\mu s}}.$$

г. В практически применяемых электромагнитных устройствах редко встречаются магнитные цепи, в которых и сечение s и магнитная проницаемость μ были бы неизменными вдоль всей цепи. Так, в сердечниках трансформаторов между пакетами железа образуются стыки, где $\mu = \mu_0$. Магнитная цепь электрической машины состоит из участков различного материала и, вообще говоря, различного сечения. В указанных случаях упрощают расчет, поступая следующим образом. Разбивают магнитную цепь по длине на отдельные участки, для каждого из которых с достаточной для практики точностью можно считать μ и s постоянными. Тогда интеграл, выражающий сопротивление магнитной цепи, разбивается на ряд слагаемых

$$\oint \frac{dl}{\mu s} = \int \frac{dl_1}{\mu_1 s_1} + \int \frac{dl_2}{\mu_2 s_2} + \dots,$$

где значки 1, 2 и т. д. указывают на соответствующие участки магнитной цепи. Так как при этом $\mu_1 = \text{Const.}$, $s_1 = \text{Const.}$ и т. д., то последнее равенство можно переписать в виде

$$\oint \frac{dl}{\mu s} = \frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \dots = \sum \frac{l}{\mu s}.$$

Закон магнитной цепи в этом случае можно, следовательно, приближенно выразить так:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{wi}{\sum \frac{l}{\mu s}}.$$

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА МАГНИТНОГО ПОТОКА

§ 16. Электромагнитная индукция тока

Магнитный поток и электрический ток даже до настоящего времени нередко воспринимаются раздельно в качестве якобы самодовлеющих процессов. Однако тесная связь между ними с несомненностью вытекает из всей совокупности того, что известно в области электричества и магнитизма.

Свыше ста лет тому назад, в 1831 г., Фарадей открыл явление электромагнитной индукции. Сущность его, как известно, заключается в следующем. Всегда, когда происходят изменения в относительном расположении магнитного потока и какого-либо проводящего контура, который полностью или отдельными своими участками лежит в области пространства, занятой магнитным потоком, и, вообще говоря, всегда, когда магнитный поток, сцепляющийся с данным проводящим контуром, как бы то ни было изменяется, — в этом контуре возникают особые электродвижущие силы, так называемые индуктированные электродвижущие силы. Если алгебраическая сумма этих электродвижущих сил, т. е. полная электродвижущая сила, индуктируемая в контуре, не равна нулю и контур замкнут, в нем возникает электрический ток.

Явление электромагнитной индукции тока предоставляет в наше распоряжение весьма много данных, могущих способствовать выяснению действительных взаимоотношений и связей магнитного потока и электрического тока (см. Главу VI).

Обращаясь к истории фарадеевского достижения, следует прежде всего отметить, что в период времени, непосредственно предшествовавший 1831 году, был сделан ряд открытий и научных работ, свидетельствовавших о необходимости нового подхода к явлениям электрическим и магнитным. Дело в том, что раньше эти две группы физических явлений представлялись совершенно обособленными и никак не связанными одна с другой. В 1820 г. Эрстед опубликовал сообщение о своем наблюдении, дающем первое звено, связывающее области электричества и магнитизма. Именно Эрстед наблюдал, что электрический ток, который протекает по проводнику, присоединенному к полюсам вольтова столба, оказывает механическое действие на расположенную вблизи магнитную стрелку и стремится повернуть ее так, чтобы она установилась перпендикулярно проводнику. Таким образом, Эрстед обнаружил магнитное поле тока. В том же 1820 г. Араго́ при помощи электрического тока намагнитил кусок стали, и Ампер представил в Парижскую Академию наук доклад о своих опытах над механическим действием токов на токи и магнитов

на токи. В 1821 г. Фарадей открыл, что проводник, по которому проходит электрический ток, стремится перемещаться вокруг полюса магнита. В 1823 г. Ампер дал свою теорию электродинамики и электромагнитизма. В 1824 г. Араго́ наблюдал успокаивающее действие медной пластины на качающуюся над ней магнитную стрелку. Баббэдж и Гершель, тщательно изучая это, казалось бы, таинственное явление и разнообразя обстановку опыта, добились обращенного эффекта. Именно, в 1825 г. они показали, что медный диск, вращающийся вокруг вертикальной оси, может увлечь в это вращение магнитную стрелку, так расположенную над медным диском, чтобы острие, на котором она покоится, находилось над осью диска, причем между стрелкой и вращающимся диском располагалась параллельная ему стеклянная пластинка, исключавшая непосредственное действие на стрелку со стороны воздушных завихрений. В том же 1825 г. Стэрджен построил свой первый электромагнит.

С момента опубликования опытов Эрстеда весь ученый мир стал деятельно изучать вновь открытую область электромагнитных явлений. Нередко бывали случаи поспешных выступлений с описанием ошибочных наблюдений. Так, например, в заседании Парижской Академии наук 6 ноября 1820 г. Френель в своем докладе заявил, что ему удалось разложить воду при помощи электрического тока, якобы возбуждавшегося магнитом, который неподвижно лежал внутри неподвижной же проволочной спирали. Присутствовавший в том же заседании Ампер указал, что он также наблюдал нечто подобное. Через полтора месяца оба автора отказались от своих утверждений, признав их несоответствующими результатам более тщательно поставленных проверочных опытов. В последующие годы Ампер неоднократно возвращался к этой теме, но, по свидетельству Беккереля, он в 1825 г. пришел к убеждению, что при помощи магнита невозможно получить электрический ток.

В такой чрезвычайно напряженной атмосфере исканий в области электромагнитизма работала и научная мысль Фарадея. Он с большой настойчивостью стремился найти новые явления, характеризующие связь между электричеством и магнитизмом. Убежденный в единстве сил природы вообще, он не мог удовлетвориться констатированием односторонней связи между физическими явлениями. Эта связь казалась ему не вполне установленной, пока не был обнаружен обратный эффект. Так и в случае электрического тока и магнитного поля. Движение электричества сопровождается магнитным полем. Должно существовать и обратное явление. В чем же оно состоит? В лабораторном дневнике Фарадея за 1822 г. есть запись: „Обратить магнитизм в электричество“. Чтобы разрешить поставленную перед собою задачу, ему пришлось проделать огромное количество опытов. С небольшими перерывами он, занимавший уже с 1825 г. пост директора лабораторий Королевского Института, всё возвращался к этой проблеме. Много раз он терпел неудачу и с огорчением отмечал в своем дневнике: „Безрезультатно“. Наконец, 29 августа 1831 г. Фарадею удалось в первый раз произвести опыт, в котором с несомненностью выявилось то, чего он так настойчиво и долго искал. В течение всего десяти рабочих дней, в промежуток времени с 29 августа по 4 ноября этого года, Фарадей не только открыл все основные явления из области электромагнитной индукции тока, но и полностью осветил их новыми физическими представлениями.

Первый, исторический, опыт Фарадея был произведен с железным кольцом, на которое были нанесены две независимые обмотки из медной проволоки (по нынешней терминологии — первичная и вторичная). Вот как описывает Фарадей этот опыт в своем лабораторном дневнике:

„Я изготовил железное кольцо (из мягкого железа); железо взято круглое, в $^7/_8$ дюйма толщиною, и кольцо имело внешний диаметр в 6 дюймов. Вокруг железного сердечника было уложено много витков медной проволоки, причем одна половина обмотки была отделена при помощи шнурка и коленкора; здесь было намотано три куска проволоки, каждый около 24 футов длиною, и они могли быть соединены в одну общую обмотку или употребляться раздельно. Изоляция отдельных частей этой обмотки была достигнута путем проверки при помощи батареи. Будем называть эту сторону кольца *A*. На другой стороне, но с интервалами от первой обмотки было намотано два куска проволоки общею длиною около 60 футов... Будем называть эту сторону *B*.

Была заряжена батарея из десяти пар пластин по 4 кв. дюйма. Витки на стороне *B* составляли одну обмотку, и концы ее были соединены медной проволокой, отходящей в сторону на некоторое расстояние и как раз над магнитной стрелкой (в 3 футах от кольца), затем концы одной из обмоток на стороне *A* присоединялись к батарее: немедленно — заметное действие на стрелку. Она колебалась и, наконец, пришла в начальное положение. При прерывании соединения обмотки *A* с батареей — снова бросок стрелки".

На другой же день после этого опыта, 30 августа, Фарадей уже совершенно отчетливо осознал связь открытого им явления с таинственными результатами экспериментов Араго́ над влиянием медного диска на магнитную стрелку.

В своих последующих опытах Фарадей наблюдал появление кратковременного индуктированного тока в катушке из медной проволоки при наличии внутри нее железного стержня, который намагничивался при помощи постоянных магнитов или размагничивался путем нарушения контакта с полюсами этих магнитов. Затем был проделан опыт, аналогичный первому опыту с железным кольцом, но при этом применялись катушки из медной проволоки без всякого железного сердечника. Далее, постоянный полосовой магнит быстро вводился внутрь катушки, присоединенной к гальванометру, или выводился из нее. Были обнаружены кратковременные отбросы стрелки гальванометра то в одну, то в другую сторону и при этом было обращено особое внимание на *необходимость наличия относительного перемещения проводника и внешнего магнитного поля.* С совершенной очевидностью была установлена причина неудачи во время многочисленных предыдущих опытов, когда это обстоятельство не было учтено. В девятый день своих опытов с вновь открытым явлением Фарадей привел во вращение медный диск, расположенный между полюсами сильного подковообразного магнита, соединив с гальванометром ось и край диска при посредстве металлических щеток. При этом стрелка гальванометра длительно оставалась отклоненной. Фарадей возбуждал таким образом постоянный ток, используя явление электромагнитной индукции. Наконец, в десятый день *Фарадей индуктировал ток простым движением проводника поперек магнитного поля и в описании этого эксперимента уже говорит о „пересечении" магнитных линий проводником.* Таким образом, вся фактическая сторона явления электромагнитной индукции была установлена с исчерпывающей полнотой и была выяснена качественная сторона общего закона электромагнитной индукции. Несколько позже Фарадей формулировал и количественные законы, которым подчиняется это явление.

Итак, уже первая серия опытов Фарадея в области электромагнитной индукции привела его к весьма важному заключению об основном усло-

вии возникновения этого явления. Мы имеем в виду относительное перемещение проводника и магнитного поля, иными словами, пересечение проводником „физических силовых линий" магнитного поля. Есть ряд случаев электромагнитной индукции, когда указанное относительное перемещение непосредственно не наблюдается и как будто бы не имеет места. Это, например, относится к первому эксперименту Фарадея с железным кольцом, на которое были нанесены неподвижные обмотки. Однако, руководствуясь принципиальными установками Фарадея и Максвелла, можно показать, что это только так кажется и что на самом деле первопричиной возникновения индуктированной электродвижущей силы и в этом случае является процесс, который мы упрощенно описываем словами — „пересечение магнитных линий проводником". Об этом будет еще речь впереди (см. §§ 18, 19 и 32—38).

Электромагнитная индукция представляет собою одно из наиболее существенных и характерных проявлений магнитного потока.

Для полного понимания общих условий, в которых протекает электромагнитная индукция, чрезвычайно большое значение имеет принцип непрерывности магнитного потока. Этот принцип, упоминавшийся нами уже раньше (§§ 5, 7, 9 и 15), был высказан самим Фарадеем, который сформулировал его в результате своих опытных исследований, специально посвященных изучению свойств того, что заполняет магнитное поле и что в настоящее время называется магнитным потоком. Фарадея же, как это было отмечено выше, мы должны считать основоположником учения о магнитном потоке, рассматриваемом в качестве физической реальности.

§ 17. Принцип непрерывности магнитного потока

а. Магнитный поток в целом и каждая магнитная линия, его составляющая, нигде не имеют ни начала, ни конца. Они непрерывны и всегда образуют замкнутые контуры.

Во всех случаях, когда магнитное поле существует в воздухе или, вообще говоря, в среде, не препятствующей опытному обследованию магнитного потока на всем его протяжении, более или менее легко можно убедиться в том, что магнитный поток действительно непрерывен. Так, например, магнитные линии в поле прямолинейного провода с током имеют форму концентрических окружностей, охватывающих провод со всех сторон. Более сложную форму имеют магнитные линии в поле криволинейного провода с током, в случае проволочной катушки, по которой идет ток, и т. п.

И иначе обстоит дело в случае магнитного потока, связанного с телами, внутрь которых мы не можем проникнуть, например в случае потока, проходящего через железо, или в случае потока, связанного с постоянным магнитом. Утверждать что-либо a priori мы не можем и должны поэтому подвергнуть магнитный поток внутри железа или магнита косвенному обследованию. Простейший способ, который позволяет нам убедиться в наличии магнитного состояния вещества, например в средней нейтральной части магнита, состоит в разламывании магнита на две половины. В образовавшейся щели между двумя половинами магнита мы всегда обнаруживаем магнитный поток, который исходит из вновь возникшего в месте излома северного полюса и входит в южный полюс, ограничивающий щель с другой стороны. Величина магнитного потока, пронизывающего щель, в точности равна величине магнитного потока,

связывающего внешние (первоначальные) полюсы магнита. В этом очень легко убедиться при помощи индуктивного метода. Кроме того, обследование показывает, что направление магнитного потока в щели так сочетается с направлением внешнего потока магнита, как это и должно быть, если магнитный поток непрерывен и проходит частью через внешнее пространство между основными полюсами магнита, а частью сквозь тело магнита. Продолжая опыт ломания магнита в отношении полученных двух его половин и далее со вновь образующимися частями магнита сколь угодно раз, мы неизменно будем обнаруживать ту же величину магнитного потока и то же его направление. Таким образом, мы можем как бы вскрывать магнитный поток, проходящий внутри магнита, и имеем основание признать результаты опыта с многократным ломанием магнита подтверждающими принцип непрерывности магнитного потока.

6. Фарадей применил метод электромагнитной индукции для обследования магнитного потока внутри постоянного магнита, не прибегая к разламыванию магнита, т. е. не нарушая его целости. Хотя его опыты на эту тему не кажутся теперь в полной мере убедительными, но тем не менее будет чрезвычайно поучительно познакомиться с ходом мыслей Фарадея, этого великого экспериментатора, и с его подходом к исследованию данного вопроса. Кроме того, есть еще один мотив тщательного рассмотрения опытов Фарадея, посвященных доказательству непрерывности магнитного потока. Дело в том, что из этих опытов непосредственно вытекают принципиальные схемы различных типов униполярных, т. е. бесколлекторных, машин постоянного тока, которые в последнее время начинают вновь привлекать к себе внимание в области электромашиностроения. Именно униполярным машинам в основном посвящена Глава V настоящей книги.

Первые опыты Фарадея, положенные в основу формулированного им принципа непрерывности магнитного потока, были произведены вскоре после открытия электромагнитной индукции тока. Впоследствии он еще раз вернулся к этому вопросу и тогда окончательно сформулировал указанный принцип.[1]

В этих опытах Фарадея, к схематическому описанию которых мы сейчас переходим, весьма ярко выявляется общий ход его идей. Фарадей применил, между прочим, магнит цилиндрической формы. Против одного полюса этого магнита NS (рис. 6) он поместил медный диск D того же диаметра, что и магнит. Расстояние между диском D и торцевой поверхностью магнита было очень невелико. Диск мог приводиться во вращение вокруг своей оси, совпадавшей с осью цилиндрического магнита. При помощи металлических щеточек, касавшихся периферии диска и его проводящей оси, составлялась электрическая цепь, включавшая гальванометр G. При вращении медного диска в его радиальных частях индуктировалась электродвижущая сила, которая возбуждала ток, измеряемый гальванометром. Фарадей сначала вращал один диск, а магнит оставлял неподвижным. При этом наблюдалось отклонение гальванометра, зависящее, конечно, от скорости вращения диска. Затем Фарадей повторил свой опыт в следующем виде: он приклеил диск к торцу магнита, проложив бумагу, и стал вращать всю систему как одно целое. И в этих условиях он получил тот же эффект. При той же скорости вращения наблюдалось прежнее отклонение гальванометра. Опыт приводил к заключению, что возникновение индуктированного тока в данном случае

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. I, 217—220; Vol. III, 3084—3117.

совершенно не зависит от того, вращается ли диск относительно неподвижного магнита, или же оба они вращаются одновременно.

Для тщательной проверки полученного результата Фарадей повторил опыт, более полно утилизируя поток, связанный с магнитом. Он разнообразил обстановку опыта всевозможными способами. По существу дело можно свести к тому опыту, в котором он заменил диск металлическим колпаком, окружавшим одну половину магнита. Расположение опыта показано схематически на рис. 7. При вращении металлического колпака K вокруг неподвижного магнита все магнитные линии, исходящие из его верхнего полюса, будут пересекаться радиусами днища колпака и образующими цилиндрической его части, в результате чего в цепи гальванометра должен получаться индуктированный электрический ток. И в данном случае, при скреплении колпака K с магнитом NS и при вращении всей системы в целом, величина и направление отклонения гальванометра G наблюдались точно такие же, как при неподвижном магните и вращении одного только колпака K.

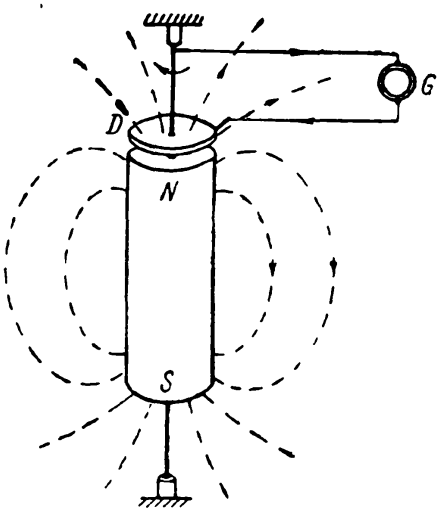


Рис. 6.

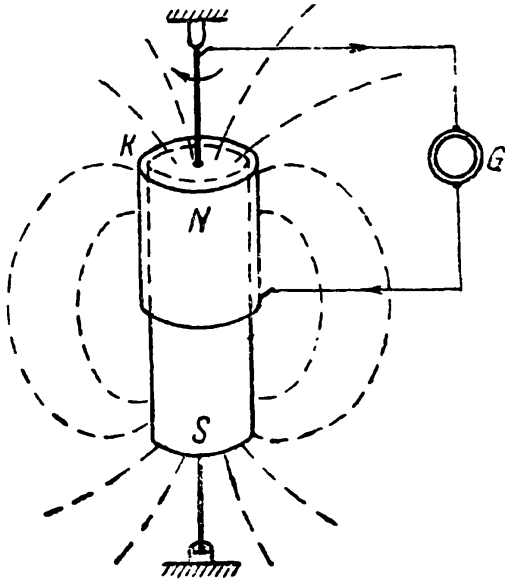


Рис. 7.

Если в только что рассмотренных опытах всё происходит в количественном и качественном отношении одинаково и действительно независимо от того, неподвижен ли магнит, или он вращается вместе с соответствующими частями электрической цепи, то естественно, повидимому, сделать заключение, к которому и пришел Фарадей, а именно что при вращении магнита вокруг его геометрической оси магнитный поток остается неподвижным в пространстве, а не вращается вместе с магнитом.

Возникает следующий вопрос. Если магнитный поток остается неподвижным в пространстве и если этот магнитный поток существует и внутри магнита, то казалось бы, что радиальные элемены тела магнита должны при его вращении перерезывать магнитные линии и, следовательно, в них должна индуктироваться электродвижущая сила. Для проверки этого заключения Фарадей проделал третью серию опытов. Он вращал только магнит, непосредственно введенный в цепь электрического тока при помощи двух трущихся контактов: одного — у поверхности магнита в нейтральной его зоне, другого — в центральной его части через посредство проводящей оси, вокруг которой вращается магнит (см. схематический рис. 8). При вращении магнита отклонение гальванометра

получалось такое же, что и в предыдущем опыте (рис. 7) при вращении металлического колпака. Этот результат можно объяснить только предположением, что число магнитных линий, пересекаемых за время одного полного оборота, осталось прежним, что, в свою очередь, может иметь место, согласно мнению Фарадея, в случае, если *все магнитные линии внешнего потока магнита замыкаются внутри него, образуя вполне замкнутые контуры.* В самом деле, схематизируя путь тока внутри магнита, можно себе представить, что вся действующая в данном случае электродвижущая сила определяется пересечением магнитных линий внутри магнита радиальным элементом AB, лежащим под щеткой (не трудно убедиться, что, предполагая путь тока внутри магнита какой-либо иной, мы всегда получим то же самое).

В результате своих опытов Фарадей пришел к выводу, что все магнитные линии, исходящие из северного полюса магнита и входящие в южный полюс, замыкаются внутри тела магнита. В п. 3117 своих „Опытных исследований по электричеству" он следующими словами формулирует принцип непрерывности магнитного потока для случая постоянного магнита:

„3117. Таким образом, внутри магнита существуют [физические] силовые линии той же *природы*, что и вне его. Даже более того, *количество* внутренних линий строго равняется количесвтву внешних. *Направление* внутренних линий связано с направлением внешних; и в действительности, внутренние линии составляют продолжение внешних, абсолютно не изменяясь по своей природе, насколько это может быть удостоверено опытом. Поэтому каждая [физическая] силовая линия, на каком бы расстоянии от магнита мы ее ни взяли, должна быть рассматриваема как замкнутый контур, проходящий некоторою своею частью через магнит и имеющий одинаковую активность в каждом месте на своем протяжении".[1]

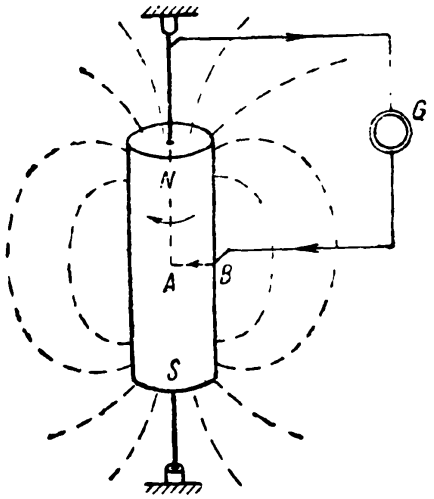


Рис. 8.

Результаты вышеописанных опытов Фарадея, как указал впоследствии Престон,[2] могут быть истолкованы с другой точки зрения. Престон разъяснил, что все явления, наблюдавшиеся Фарадеем, должны были бы иметь место и в том случае, если бы магнитный поток был жестко связан с магнитом и вращался вместе с ним в пространстве.

Действительно, рассмотрим схему опыта, изображенную на рис. 7, применительно к тому случаю, когда металлический колпак K был скреплен с магнитом. Фарадей предполагал, что сохраняющие свою неподвижность магнитные линии во время вращения всей системы (колпак и магнит) пересекаются радиальными элементами днища колпака и образующими цилиндрической части колпака. Рассматривая явление с точки зрения Престона, т. е. считая магнитный поток жестко связанным с магнитом и вращающимся одновременно с ним, мы приходим к заключению,

[1] Взятые в квадратные скобки слова вставлены переводчиком, автором настоящей книги, для того, чтобы было ясно, что Фарадей говорит не о „силовых линиях" в нынешнем понимании этого термина (линии вектора магнитной силы), но о трубках магнитной индукции или магнитных линиях, как составляющих магнитного потока. Курсив принадлежит самому Фарадею.

[2] Preston. „Philosophical Magazine" за 1885 и 1891 гг.

что никакие части колпака не будут в таком случае пересекать магнитных линий, так как будет полностью отсутствовать какое-либо перемещение колпака относительно магнитных линий. Но зато все магнитные линии в своем вращении будут пересекаться неподвижными частями контура тока, т. е. проводниками, составляющими внешнюю цепь между щетками и присоединенными к гальванометру. При этом количество магнитных линий, пересеченных за время одного полного оборота всей системы, останется, конечно, таким же, как и с точки зрения Фарадея. Не трудно убедиться, что и направление индуктированной в цепи электродвижущей силы получается такое же.

Рассмотрим третий опыт Фарадея (рис. 8), когда магнит вращался в своем собственном магнитном поле. Как легко видеть, и в этом случае величина и направление индуктированной электродвижущей силы должны быть одинаковы, независимо от того, будем ли мы считать, что радиальные элементы магнита пересекают неподвижные магнитные линии (точка зрения Фарадея), или предположим, что вращающиеся магнитные линии пересекаются внешними частями электрической цепи (точка зрения Престона).

Необходимо указать, что допустима и третья точка зрения, представляющая собою некоторый, так сказать, компромисс между точками зрения Фарадея и Престона. Именно, совершенно несомненно, что окончательный результат останется неизменным, если магнитный поток не будет вполне жестко связан с магнитом и в виду этого только в известной степени увлекается вращающимся магнитом, так что он отстает от магнита и вращается с какою-либо меньшей скоростью. Степень отставания магнитного потока должна, конечно, определяться всей обстановкой эксперимента. В зависимости от общих условий указанное отставание может быть максимальным (неподвижность магнитного потока) или минимальным (полное увлечение потока вращающимся магнитом). Таким образом, точки зрения Фарадея и Престона являются, повидимому, лишь предельными частными случаями более общего подхода к трактовке только что рассмотренных опытов с вращающимся магнитом. Ясно, конечно, что и в случае неполного увлечения магнитного потока величина индуктированной электродвижущей силы получится точно такая же, как, в предельных частных случаях. К этому вопросу мы еще вернемся в Главе V.

В свое время работа Престона возбудила очень большой интерес. Последовали многочисленные попытки подтвердить ту или иную точку зрения при помощи специально поставленных опытов, которые все были основаны на использовании явления электромагнитной индукции.[1] Однако все попытки этого рода не привели к каким-либо определенным результатам. Это объясняется главным образом тем, что, как бы мы ни ставили опыт с вращающимся магнитом, необходимость иметь замкнутый электрический контур (полностью проводящий или частично замыкающийся линиями электрического смещения) всегда неизбежно приводит к возможности объяснить результаты опыта с любой из трех точек зрения. Никаким экспериментированием в области электромагнитной индукции, надо полагать, нельзя безупречно строго доказать справедливость той или иной точки зрения относительно поведения магнитного потока, связанного с вращающимся магнитом. Только руководствуясь общими соображениями и анализируя обстановку эксперимента, повидимому,

[1] Подробный анализ всего вопроса в целом содержится в статье Л. Б. Слепяна „Проблема униполярной индукции". Изв. Петрогр. Политехнич. института, Отдел техники, естествозн. и матем., 1914, т. XXII, стр. 55.

можно притти к некоторому правдоподобному заключению по данному вопросу в каждом частном случае.

Каковы бы ни были результаты анализа опытов с вращающимся магнитом, необходимо, однако, со всею определенностью констатировать следующее: *Фарадей дал безусловно правильную и точную формулировку принципа непрерывности магнитного потока.* Неизменно руководимый интуицией, он по существу исходил из своих общих представлений о магнитном потоке, образовавшихся у него в связи с многочисленными другими экспериментами, в которых главным объектом внимания были основные свойства магнитного потока.

в. Максвелл, продолжавший работы Фарадея, весьма отчетливо понимал, сколь большое значение имеет принцип непрерывности магнитного потока для ряда дальнейших умозаключений, и поэтому стремился дать математическое обоснование этого принципа. Сущность рассуждений Максвелла сводится к следующему.[1] Возьмем именно тот случай, когда магнитное поле, существующее внутри тела, недоступно непосредственному наблюдению, и для этого рассмотрим какой-либо постоянный магнит NS (рис. 9). Магнитные массы, которые, согласно условному предположению, участвуют в образовании поля данного постоянного магнита, мы должны считать распределенными на поверхности полюсов N и S. Обозначим эти магнитные массы через $+m$ и $-m$. Представим себе замкнутую поверхность s, охватывающую один из полюсов, например северный, и проходящую сквозь тело магнита. На рис. 9 изображено сечение этой поверхности плоскостью чертежа. Рассмотрим для данной замкнутой поверхности величину

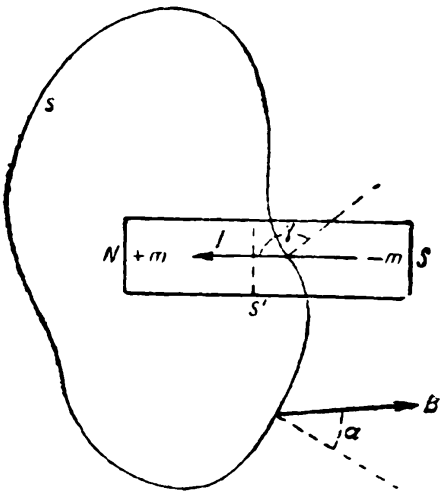


Рис. 9.

$$\Phi = \oint B \cos \alpha \, ds,$$

где α — угол между направлением вектора магнитной индукции B и внешней нормалью к элементу поверхности ds и, следовательно, $B \cos \alpha$ — нормальная составляющая магнитной индукции в некоторой точке поверхности s.

Φ есть полный магнитный поток, пронизывающий всю рассматриваемую поверхность s. Попытаемся рассчитать этот поток. Обратимся к известному уже нам соотношению

$$B = \mu_0 H + I.$$

Все три члена, входящие в это соотношение, являются векторами. В случае однородной и изотропной среды они совпадают по направлению, но в более сложной обстановке B, H и I могут и не совпадать по направлению.

Обозначая через β и γ углы, образуемые векторами H и I с внешней нормалью к поверхности s, можем написать

$$B \cos \alpha = \mu_0 H \cos \beta + I \cos \gamma,$$

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 402.

откуда следует

$$\Phi = \oint_s B \cos\alpha \, ds = \mu_0 \oint_s H \cos\beta \, ds + \oint_s I \cos\gamma \, ds,$$

т. е. интересующая нас величина Φ выражается суммою двух интегралов, взятых по всей замкнутой поверхности s.

Чтобы определить величину первого интеграла, применяем теорему Гаусса, на основании которой пишем

$$\oint_s H \cos\beta \, ds = \frac{1}{\mu_0} m.$$

Что касается второго интеграла, то для определения его расчленим мысленно данный магнит на бесконечное количество нитеобразных магнитов, причем эти нити ориентированы так, чтобы они были везде касательны к вектору интенсивности намагничения I, характеризующему магнитное состояние вещества. Таким образом получим пучок бесконечно тонких магнитов длиною l с магнитными массами $+dm$ и $-dm$ на концах. Произведение $l \cdot dm$ представляет собою соответствующий магнитный момент, относя который к единице объема, получим величину интенсивности намагничения.

Если ds' есть поперечное сечение нитеобразного магнита, перпендикулярное его длине, то объем его выразится через $l \cdot ds'$. Следовательно, интенсивность намагничения будет

$$I = \frac{ldm}{lds'} = \frac{dm}{ds'}.$$

Заменим нормальное сечение элементарного магнита ds' через элемент рассматриваемой замкнутой поверхности s. Ясно, конечно, что имеет место такое соотношение:

$$ds' = -ds \cdot \cos\gamma.$$

Здесь знак минус берется потому, что вектор интенсивности намагничения I внутри магнита в данном случае, когда замкнутая поверхность s охватывает северный полюс магнита, направлен в сторону внутренней нормали к этой поверхности.

На основании последнего соотношения можем написать

$$I = \frac{dm}{ds'} = -\frac{1}{\cos\gamma} \cdot \frac{dm}{ds}.$$

Отсюда получаем

$$dm = -I \cos\gamma \, ds.$$

Интегрируя это выражение по всей замкнутой поверхности, получаем

$$m = -\oint_s I \cos\gamma \, ds,$$

или

$$\oint_s I \cos\gamma \, ds = -m.$$

Следовательно, интересующий нас полный магнитный поток, пронизывающий рассматриваемую замкнутую поверхность s, будет

$$\Phi = \oint_s B \cos\alpha \, ds = \mu_0 \oint_s H \cos\beta \, ds + \oint_s I \cos\gamma \, ds = m - m = 0 .$$

Соотношение

$$\oint_s B \cos\alpha \, ds = 0$$

и представляет собою данную Максвеллом математическую формулировку принципа непрерывности магнитного потока.

Физический смысл полученного математического соотношения заключается в следующем. Во всех точках замкнутой поверхности s, лежащих вне магнита, поле доступно нашему наблюдению, и мы непосредственным опытом можем убедиться в том, что в рассмотренном случае, когда поверхность s охватывает северный полюс, магнитная индукция вне магнита всегда имеет положительную составляющую в направлении внешней нормали к поверхности, т. е. магнитный поток, который пронизывает часть поверхности s, находящуюся вне магнита, имеет положительное значение. Следовательно, полученное соотношение указывает, что магнитный поток внутри рассматриваемого магнита направлен в сторону внутренней нормали к той же замкнутой поверхности s. Обозначая через Φ' поток, пронизывающий поверхность s вне магнита, и через Φ'' — поток, пронизывающий эту поверхность внутри магнита, можем написать

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' .$$

Но мы уже знаем, что в данном случае

$$\Phi = 0,$$

и поэтому

$$\Phi' = -\Phi'' .$$

Знак минус соответствует различной ориентировке этих двух составляющих магнитного потока относительно внешней нормали к поверхности s. Составляющие эти равны по абсолютной величине.

Итак, математическая формулировка принципа непрерывности магнитного потока гласит, что *полный магнитный поток, проходящий сквозь любую замкнутую поверхность в направлении внешней нормали, равен нулю.*

Из этого положения непосредственно вытекает следующее:

Магнитный поток в целом и, в частности, каждая входящая в его состав магнитная линия всегда и везде представляют собою принципиально замкнутые контуры, не имеющие ни начала, ни конца. Магнитные линии никоим способом не могут быть разрезаны или разорваны, и обнаружение их концов ни в каких процессах, происходящих в магнитном поле, невозможно.

§ 18. Первая и вторая формулировки закона электромагнитной индукции

а. В XXVIII серии своих „Опытных исследований по электричеству" Фарадей устанавливает следующее основное положение, характеризующее индуктированный электрический ток с количественной стороны:

„... количество электричества, протекшего по цепи тока, прямо пропорционально числу перерезанных линий".[1]

Еще в I серии „Исследований" Фарадей констатирует зависимость силы индуктированного тока от сопротивления проводника:

„Эти результаты показывают, что токи, производимые в телах при помощи магнито-электрической индукции, пропорциональны их проводимости. Что они *в точности* пропорциональны проводимости и всецело зависят от нее, доказывается, я полагаю...".[2] (Далее следует ссылка на ряд опытов с различными проводящими материалами.)

Именно все эти выводы из опытов Фарадея позволяют написать следующее математическое соотношение, на которое мы уже в общем ссылались выше в § 7 Главы II:

$$q = -\frac{\Phi''}{r}.$$

Здесь q — количество электричества, протекшего в течение некоторого промежутка времени через любое поперечное сечение контура, проводящего индуктированный ток, Φ'' — число магнитных линий, *пересеченных* рассматриваемым контуром за это время, и r — электрическое сопротивление контура. Знак минус (—) мы вводим в соответствии с данными непосредственного опыта, в целях соблюдения установленного правила, связывающего положительное направление магнитного потока, пронизывающего некоторый замкнутый контур, с положительным направлением обтекания вдоль этого контура (правило правого винта или так называемое правило штопора). Поэтому количеству Φ'' будем приписывать положительное значение в случае, когда процесс пересечения магнитных линий влечет за собою увеличение магнитного потока, сцепляющегося с рассматриваемым контуром, и отрицательное значение в противном случае.

Исходя из вышеприведенного основного соотношения, легко можно найти выражение для индуктированной электродвижущей силы. Действительно, беря производные по времени от обеих частей указанного равенства, имеем

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{d\Phi''}{dt}.$$

Так как

$$\frac{dq}{dt} = i,$$

где i — сила тока, то можем написать

$$ri = -\frac{d\Phi''}{dt}.$$

Но произведение ri представляет собой не что иное, как электродвижущую силу, расходуемую в данном случае на преодоление сопротивления цепи, т. е.

$$ri = e.$$

---

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, 3115: „... the quantity of electricity thrown into a current is directily as the amount of curves intersected".

[2] Faraday. Experimental Researches of Electricity, Vol. I, 213: „These results tend to prove that the currents produced by magneto-electric induction in bodies are proportional to their conducting power. That they are *exactly* proportional to and altogether dependent upon the conducting power, is, I think, proved by..."

На основании этого окончательно получаем

$$e = -\frac{d\Phi''}{dt}.$$

Итак, *электродвижущая сила, индуктируемая в некотором контуре, не зависит от вещества, формы и размеров проводника, из которого контур состоит. Величина этой электродвижущей силы определяется исключительно скоростью пересечения магнитных линий контуром.*

Так как данная *первая* формулировка закона электромагнитной индукции является лишь простой перефразировкой основных положений, установленных Фарадеем, и в полной мере соответствует его представлению о *пересечении* магнитных линий проводником, как о первопричине индуктирования тока, в дальнейшем мы будем называть соотношение

$$e = -\frac{d\Phi''}{dt}$$

фарадеевской формулировкой закона электромагнитной индукции.

6. Вскоре после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции Ф. Нейман сделал попытку обосновать математическую теорию этого явления, исходя из закона Ленца. Вслед за тем Гельмгольц и В. Томсон (Кельвин) показали, что электромагнитная индукция может быть рассматриваема как следствие, вытекающее из закона сохранения энергии. Во всех этих работах авторы пришли к выражению индуктированной электродвижущей силы в виде производной по времени от некоторой величины, физический смысл которой не был, однако, достаточно ясно вскрыт. Максвелл, основываясь на опытах Фарадея и *принимая во внимание установленный Фарадеем же принцип непрерывности магнитного потока*, показал, что здесь речь идет о магнитном потоке, который охватывается некоторым замкнутым контуром или, как говорят, сцепляется с данным контуром. Таким образом, данная Максвеллом формулировка закона электромагнитной индукции гласит:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где Φ есть полный магнитный поток, сцепляющийся с некоторым контуром. Существенно необходимо подчеркнуть, что в отличие от фарадеевской (первой) формулировки того же закона здесь в явном виде речь идет не о числе пересеченных магнитных линий, которое было обозначено через Φ'', а именно о *совокупности* магнитных линий, т. е. о магнитном потоке Φ, охватываемом контуром. Легко показать, что отмеченное различие носит чисто формальный характер.

Действительно, контур любого электрического тока всегда бывает принципиально замкнутым. Максвеллу принадлежит большая заслуга констатирования этого важного положения, позволившего ему в дальнейшем, на основе закона электромагнитной индукции и закона магнитодвижущей силы, составить свои известные дифференциальные уравнения электромагнитного поля, представляющие собою лишь дифференциальную форму этих законов. Магнитный поток также всегда образует замкнутую систему. Поэтому геометрическая связь между магнитным потоком и электрическим током может быть только такая, как у двух звеньев обычной цепи (рис. 10).

Здесь будет очень уместно привести подлинные слова Максвелла,

который в своем „Трактате об электричестве и магнитизме“ следующим образом высказывается по рассматриваемому вопросу:

„Представление о непрерывности силовых линий,[1] к которому пришел Фарадей, исключает возможность внезапного появления их там, где их раньше не было ни одной. Если, следовательно, число линий, которые пронизывают проводящий контур, претерпевает изменение, то это может происходить только благодаря тому, что или контур движется поперек силовых линий, или силовые линии движутся поперек контура. В обоих случаях в цепи возникает ток“.[2]

Итак, ни одна магнитная линия, сцепляющаяся с каким-либо контуром тока, не может выйти из этого контура без того, чтобы она не была им пересечена. Магнитный поток, пронизывающий неизменно замкнутый контур, может претерпеть увеличение или уменьшение только в процессе пересечения контуром составляющих поток магнитных линий при их выхождении из контура или при их вхождении в контур. Иначе быть не может. Ясно поэтому, что в таком случае мы имеем

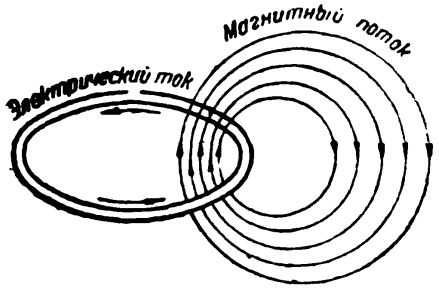


Рис. 10.

$$d\Phi'' = d\Phi$$

и соответственно этому можем написать

$$e = -\frac{d\Phi''}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

в. С математической точки зрения преобразование первой формулировки (*фарадеевской*) во вторую (*максвелловскую*) эквивалентно преобразованию линейного интеграла вектор-потенциала магнитного поля, где интегрирование ведется вдоль некоторого замкнутого контура, в поверхностный интеграл вектора магнитной индукции, где интегрирование распространяется на площадь, ограниченную рассматриваемым контуром. При этом следует иметь в виду, что такое преобразование линейного интеграла в поверхностный возможно и имеет смысл *только при условии*, что замкнутый контур цепи не претерпевает никаких изменений, нарушающих его непрерывность как строго определенного контура. Соответственно этому, *только при условии неизменности контура электрической цепи* первая и вторая формулировки закона электромагнитной индукции вполне тождественны и взаимно заменяемы.

Если же условие непрерывности и неизменности контура цепи не выполняется, то необходимо специальное рассмотрение вопроса о том, в каких случаях соотношение

$$-\frac{d\Phi''}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

может всё же считаться сохраняющим свою правомерность и когда оно не имеет места.

---

[1] В данном случае термином „силовая линия“ Максвелл обозначает то, что Фарадей назвал „физической силовой линией“ магнитного поля и что мы рассматриваем в качестве реальной составляющей магнитного потока и условно называем теперь „магнитной линией“.

[2] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 541: „The conception which Faraday had of the continuity of the lines of force precludes the possibility of their suddenly starting into existence in a place where there were none before. If therefore, the number of lines which pass through a conducting circuit is made to vary, it can only be by the moving across the lines of force or else by the lines of force moving across the curcuit. In either case a current is generated in the circuit“.

§ 19. Некоторые частные случаи электромагнитной индукции

а. В генераторах переменного тока сравнительно небольшой мощности обмотка, в которой индуктируется электродвижущая сила, иногда входит в состав ротора, т. е. вращающейся части машины. Для приключения этой обмотки к внешней цепи обычно применяют так называемые контактные кольца, надлежащим образом насаженные на вал машины. К этим контактным кольцам присоединяются концы генераторной обмотки. Внешняя же цепь питается переменным током от неподвижных щеток, которые трутся о поверхность контактных колец. Таким путем образуется замкнутая электрическая цепь.

Наличие контактных колец не позволяет назвать рассматриваемую цепь совершенно неизменяемой. Однако то обстоятельство, что эти кольца находятся вне главного магнитного потока генератора, *никак не сцепляются с потоком* и действительно не имеют какого бы то ни было отношения к процессу индуктирования электродвижущей силы в обмотке данного генератора, — это обстоятельство дает нам полное право считать рассматриваемую замкнутую цепь *электрически неизменяемой цепью*. Хотя с точки зрения чисто геометрической подобная цепь и претерпевает непрерывные изменения (в отношении конфигурации), мы можем совершенно игнорировать в данном случае наличие контактных колец и имеем безусловно достаточное основание для того, чтобы пользоваться в отношении этой цепи как фарадеевской, так и максвелловской формулировками закона электромагнитной индукции, не делая никакого различия между ними.

б. В разного рода коллекторных машинах мы имеем условия, вполне аналогичные случаю контактных колец. Как известно, коллектор или коммутатор всегда располагаются вне той области, где индуктируются электродвижущие силы. Поэтому и в данном случае мы имеем право при рассмотрении процесса электромагнитной индукции в отдельных элементах обмотки, присоединенных к пластинам коллектора, применять и фарадеевскую и максвелловскую формулировки, останавливаясь в каждом частном случае на той, которая оказывается, в зависимости от обстоятельств, более удобной. И в данном случае мы можем игнорировать всякого рода переключения, происходящие вне зоны генераторного процесса и рассуждать так, как будто бы замкнутая цепь была электрически неизменяемой.

в. В цепях трансформаторов переменного тока мы имеем примеры электрически неизменяемых цепей, которые, вообще говоря, сохраняются неизменными и с точки зрения чисто геометрической. Ясно, конечно, что для трансформаторных цепей должны быть вполне эквивалентны обе формулировки закона электромагнитной индукции, фарадеевская и максвелловская. Однако на практике мы легко можем проследить магнитный поток, сцепляющийся с витками обмоток трансформатора, и точно измерить его в каждый данный момент времени. Что же касается процесса пересечения магнитных линий проводниками, из которых состоят обмотки трансформатора, то этот процесс недоступен непосредственному контролю и обычно совершенно игнорируется. В связи со сказанным расчет электродвижущих сил, индуктируемых в обмотках трансформаторов, обычно производят, исходя из максвелловской формулировки закона электромагнитной индукции. Это, конечно, вполне правильно и даже является практически единственным выходом, так как мы не имеем способов точного учета пересечений, о которых идет речь. Но во всяком случае

пересечение магнитных линий витками трансформаторных обмоток в действительности происходит. Так мы должны утверждать, основываясь на принципе непрерывности магнитного потока. И это обстоятельство побуждает нас тщательно проанализировать процесс индуктирования электродвижущих сил в трансформаторах и выяснить, как именно происходит перемещение магнитных линий, составляющих магнитный поток, который мы в основном считаем локализованным в объеме железных сердечников. Что касается магнитного рассеяния, то оно не имеет решительно никакого отношения к тому движению магнитных линий, о котором идет речь и которое эквивалентно изменениям главного магнитного потока в трансформаторе. Теперь мы только констатируем наличие подобного движения магнитных линий и отмечаем, что фарадеевская формулировка закона электромагнитной индукции имеет в случае трансформаторных обмоток точно такой же физический смысл, как и максвелловская формулировка, хотя последняя практически более удобна и легче применима. В следующей Главе IV, в § 37—40, мы еще раз вернемся к данному вопросу.

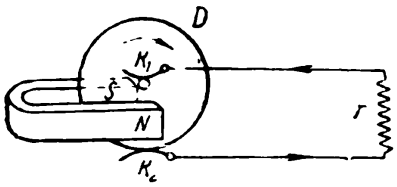


Рис. 11.

г. Для иллюстрации тех расхождений, которые могут иметь место в отношении применимости фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции, рассмотрим несколько случаев, когда мы встречаемся с проводящим контуром, претерпевающим существенные изменения.

Представим себе простейший электромагнитный генератор в виде некоторой дисковой машины, схематически изображенной на рис. 11. Медный диск D, могущий вращаться вокруг оси, проходящей через его центр, расположен между полюсами магнита NS. При помощи щеток K_1 и K_2, касающихся оси и края диска D, цепь замыкается через какое-либо внешнее сопротивление r. Щетки устанавливаются так, чтобы через их посредство в цепь включался радиальный элемент диска, находящийся в каждый данный момент времени как раз между полюсами магнита NS. Во время вращения диска D в нем генерируется индуктированная электродвижущая сила постоянного направления и соответственно возникает ток, проходящий в основном через радиальный элемент диска между щетками K_1 и K_2, а затем через соединительные провода и сопротивление r.

Рассматривая замкнутый контур тока, мы совершенно определенно можем утверждать, что сцепляющийся с ним магнитный поток остается неизменным во все время вращения диска D. Следовательно, для данного контура, действительно являющегося именно тем контуром, вдоль которого течет индуктированный электрический ток, мы имеем полное основание написать

$$\frac{d\Phi}{dt}=0.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае так называемой униполярной индукции максвелловская формулировка закона электромагнитной индукции непосредственно неприложима, если только мы придерживаемся фактической стороны дела и не прибегаем к условному осложнению реального контура тока такими участками, по которым ток на самом деле не протекает.

В то же время пересечение магнитных линий будет происходить в той части действительного контура тока, где мы имеем непрерывное

движение радиальных элементов диска D поперек магнитного поля. В этом случае несомненно, что

$$\frac{d\Phi}{dt} \neq 0,$$

и фарадеевская формулировка закона электромагнитной индукции полностью применима. Этой именно формулировкой обычно исключительно и пользуются при расчете униполярных динамомашин.

В рассматриваемом случае электродвижущая сила индуктируется, хотя и не наблюдается изменений магнитного потока, т. е. как будто бы вопреки максвелловской формулировке. Но дело в том, что установленная Фарадеем основная причина возникновения электромагнитной индукции, т. е. пересечение магнитных линий, здесь имеется в наличности, а формулировка Максвелла справедлива без всяких оговорок лишь в отношении неизменяемого замкнутого контура.

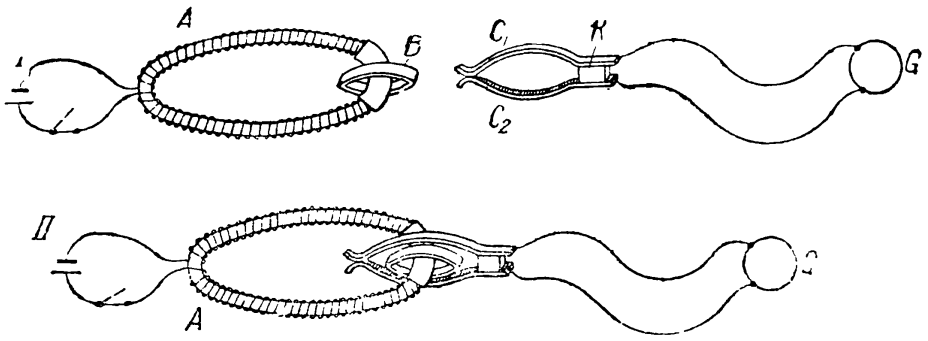


Рис. 12.

д. В качестве второго примера неприменимости максвелловской формулировки закона, характеризующего явление электромагнитной индукции, рассмотрим схему одного опыта,[1] имевшего целью выяснение принципиального значения воззрений Фарадея в отношении первопричины этого явления.

Было взято железное кольцо A с равномерно распределенной на нем обмоткой из некоторого числа витков изолированной проволоки, по которой пропускался постоянный ток (рис. 12, позиция *I*). Так как в данном случае мы имеем более или менее симметричный кольцевой соленоид, то все магнитные линии практически расположены, как известно, внутри него, проходя в основном по железному сердечнику. На кольцо был наложен металлический челнок B, состоявший из медной пластины шириною около 1 см, которая была изогнута как показано на рис. 12. Челнок этот был надлежащим образом изолирован от железного кольца и покрывавшей кольцо обмотки. Контур второй электрической цепи состоял из баллистического гальванометра G, гибких соединительных проводов и двух пружинящих контактных пластин C_1 и C_2, которые были изготовлены из меди, крепились к деревянной колодке K и соприкасающимися концами замыкали цепь гальванометра. Благодаря достаточным размерам контактных пластин C_1 и C_2, а также благодаря приданной им форме они образовывали род щипцов, которые могли надвигаться на металлический челнок B так, что *цепь гальванометра G оставалась*

[1] Описываемый опыт был произведен мною в 1901 г. *В. Миткевич.*

неизменно замкнутой и при этом железный сердечник вместе с проходящим по нему магнитным потоком мог быть введен внутрь проводящего контура, в состав которого входили описанные щипцы C_1 и C_2. Это второе расположение частей рассматриваемой системы представлено на позиции *II* рис. 12.

Сравнивая позиции *I* и *II*, мы видим, что в первом случае магнитный поток железного кольца не сцепляется с проводящим контуром, содержащим в себе гальванометр, во втором же случае это сцепление имеет место. Вместе с тем мы можем утверждать, что во всё время перехода от позиции *I* к позиции *II* электрическая цепь гальванометра ни на момент не размыкается. Спрашивается, будет ли при этом индуктироваться ток в цепи гальванометра?

Недостаточно четкое отношение к данному вопросу приводило и до последнего времени приводит даже весьма, вообще говоря, компетентных электриков к положительному ответу. Действительно, максвелловская формулировка закона электромагнитной индукции, казалось бы, дает право утверждать, что в рассматриваемом случае ток будет индуктироваться в цепи гальванометра. Однако, обращаясь к фарадеевскому представлению об основной причине явления электромагнитной индукции, мы приходим к заключению, что за время изменения внешнего магнитного потока, пронизывающего контур цепи гальванометра, *никакого пересечения магнитных линий проводником не происходит* и, следовательно, не может индуктироваться какая-либо электродвижущая сила, т. е. гальванометр должен оставаться в покое.

Опыт полностью подтверждает последнее заключение, непосредственно вытекающее из воззрений Фарадея на сущность явления электромагнитной индукции. Прохождение челнока B между концами раздвигаемых им пружин C_1 и C_2, которое сопровождается появлением внешнего магнитного потока, пронизывающего контур цепи гальванометра G, не вызывает никакого индуктированного тока.

Для проверки того, достаточно ли чувствителен гальванометр, был произведен следующий контрольный опыт. При введенном в щипцы C_1 C_2 железном кольце (рис. 12, позиция *II*) прерывался или вновь замыкался ток, питающий намагничивающую обмотку кольца. В обоих случаях наблюдался значительный отброс баллистического гальванометра.

Рассмотренный эксперимент, весьма наглядно иллюстрирующий значение фарадеевской концепции о пересечении магнитных линий, вовсе не является указанием на какую-либо погрешность в формулировке закона электромагнитной индукции, данной Максвеллом. Дело объясняется очень просто. В данном случае максвелловская формулировка совершенно не применима, так как во время процесса возникновения внешнего магнитного потока, который в конце концов пронизывает цепь гальванометра, мы имеем дело со сложным, разветвляющимся и непрерывно изменяющимся контуром, к которому неприменимо исходное соотношение

$$d\Phi'' = d\Phi,$$

использованное Максвеллом при выводе его формулировки. Иными словами, в рассматриваемом случае не может быть проведено упомянутое выше преобразование линейного интеграла вектор-потенциала магнитного поля в поверхностный интеграл вектора магнитной индукции.

По поводу только что описанного опыта автор, будучи в Лондоне в 1903 г., имел случай обменяться мнениями с профессором Сильванусом

Томпсоном, который вообще глубоко вникал во все соображения Фарадея, касавшиеся явления электромагнитной индукции. С. Томпсон проявил большой интерес к этому опыту, иллюстрирующему идеи Фарадея, и со своей стороны предложил очень наглядную схему, изображенную на рис. 13. Она еще отчетливее показывает сущность тех изменений в контуре, которые сопровождаются возникновением магнитного потока, пронизывающего цепь гальванометра без того, чтобы имели место пересечения магнитных линий проводником этой цепи. В данной схеме A есть то же намагничиваемое постоянным током железное кольцо, что и на рис. 12. Цепь гальванометра G может замыкаться при помощи рубильников K_1 и K_2 через любую из двух ветвей: $P_1 Q_1$ или через $P_2 Q_2$. При включении рубильника K_1 получается замкнутый контур $GP_1 Q_1 G$, который совершенно не связан с кольцом A и, следовательно, не пронизывается магнитным потоком, проходящим по этому железному кольцу. Если же, при разомкнутом рубильнике K_1 включить рубильник K_2, то создается замкнутый контур $GP_2 Q_2 G$, который проходит сквозь кольцо A и, следовательно, сцепляется с магнитным потоком кольца. При включении рубильника K_1 мы имеем взаимное расположение намагниченного кольца и замкнутой цепи гальванометра, соответствующее позиции *I* на рис. 12. При включенном же рубильнике K_2 получается расположение, соответствующее позиции *II* рис. 12. Попеременное включение рубильников K_1 и K_2 можно производить таким образом, чтобы цепь гальванометра все время была замкнутой. Для этого надо только включить один из двух рубильников раньше, чем второй рубильник будет разомкнут. Период времени, когда включены оба рубильника, соответствует процессу прохождения челнока B между концами пружин C_1 и C_2 на рис. 12. Ясно, конечно, что подобного рода изменения замкнутого проводящего контура, производимые попеременным включением и выключением рубильников K_1 и K_2 (рис. 13), не должно сопровождаться возникновением какой бы то ни было индуктированной электродвижущей силы в цепи гальванометра.

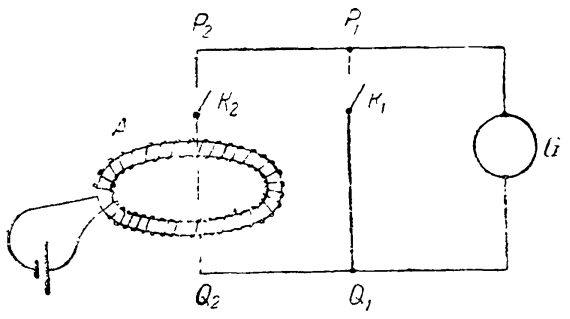


Рис. 13.

Подобная подмена контура в явном или замаскированном виде может встречаться при постановке различных опытов, имеющих целью использование явления электромагнитной индукции и приводящих к недоразумениям в случае недостаточно правильного трактования основных законов индукции.

Геринг применил расположение опыта, вполне подобное тому, что было в описанном опыте с намагниченным железным кольцом. Внутрь проводящего контура с гальванометром G (рис. 14), замыкавшегося через посредство контактных пружин C_1 и C_2, Геринг вводил среднюю часть полосового постоянного магнита M, изображенного в разрезе. Сечение этого длинного магнита имело вид весьма вытянутого прямоугольника с добавлением заострений на узких краях с целью облегчения при вдвигании магнита M между концами пружин C_1 и C_2. Иными словами, периметр сечения магнита имел форму удлиненного челнока. Проводящая поверхность магнита обеспечивала замкнутость цепи гальванометра G во все время вдвигания магнита внутрь контура цепи. И в опыте Геринга, конечно, никакой индуктированной электродвижущей силы

не было обнаружено по той же причине, что и в опыте с железным намагниченным кольцом (рис. 12). То обстоятельство, что участок рассматриваемого контура, заключенный между концами пружин C_1 и C_2 и проходивший через тело магнита, перемещался вместе с магнитом и с его магнитным потоком, по существу никакого изменения не вносило, так как при этом отсутствовали пересечения магнитных линий проводником.

е. Остановимся еще на одной схеме опыта, в котором магнитный поток, сцепляющийся с некоторым проводящим контуром, может непрерывно возрастать в течение довольно длительного промежутка времени и все же при этом не возникает никакой индуктированной электродвижущей силы. Представим себе (рис. 15) некоторый железный сердечник F прямоугольной формы, подобный тому, как это применяется в трансформаторах. Допустим, что в этой железной раме создается постоянный магнитный поток при помощи вспомогательной обмотки W, питаемой от батареи. На правую вертикальную часть железной рамы свободно насажен каркас катушки A, могущий вращаться вокруг своего сердечника (благодаря соответствующим приспособлениям). Каркас A в нижней части снабжен металлическим контактным кольцом C, к которому присоединен один конец очень длинной изолированной проволоки LL. Вся эта проволока предварительно намотана на катушку B, также снабженную контактным кольцом D, к которому приключен второй конец проволоки. Катушка B может вращаться вокруг оси O_1 O_2. При посредстве щеток, прижимающихся к обоим контактным кольцам C и D, составляется замкнутая цепь, включающая в себе гальванометр G.

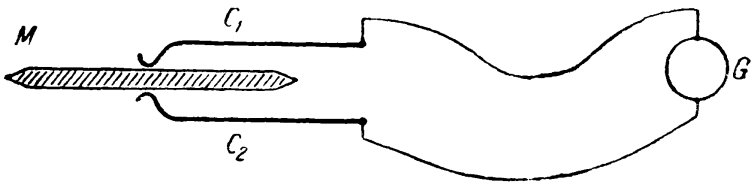


Рис. 14.

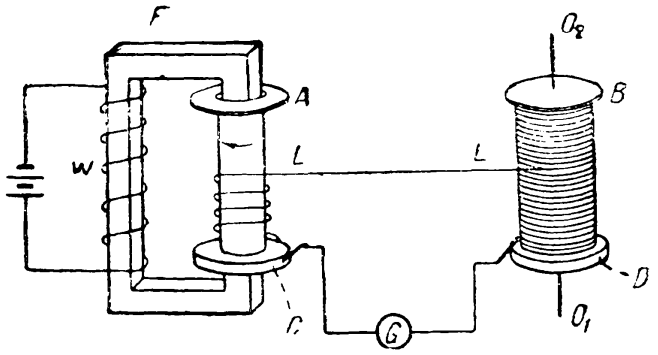


Рис. 15.

При вращении катушки A в направлении, показанном стрелкою на рис. 15, на нее будет накладываться всё большее и большее число витков изолированной проволоки LL, сматывающейся с катушки B. По мере увеличения числа витков на катушке A магнитный поток, проходящий по железному сердечнику сквозь эту катушку, будет всё в большей степени сцепляться с контуром $GLLG$. Как принято говорить, число потокосцеплений с замкнутым контуром гальванометра будет постепенно и неуклонно возрастать в течение промежутка времени, определяемого длиною проволоки LL и скоростью вращения катушки A.

Ошибочно пытаясь использовать в рассматриваемом случае максвелловскую формулировку закона электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

можно было бы ожидать, что в цепи гальванометра будет индуктироваться соответствующая электродвижущая сила и что будет наблюдаться

его отклонение всё время, пока длится наматывание проволоки на катушку *A*. Ничего подобного, конечно, не происходит, так как и в данном примере *магнитные линии нигде не пересекаются контуром цепи.*

Наличие контактного кольца *C*, сквозь которое проходит основной магнитный поток, значительно осложняет в рассматриваемом случае контур цепи гальванометра. Выше мы указывали, что контактные кольца, применяемые обычно в электрических машинах и полностью вынесенные из области, где происходят электромагнитные процессы, ничего не привносят в контур цепи машины и могут быть совершенно игнорированы при рассмотрении явления электромагнитной индукции. Однако в случае общей схемы опыта, изображенной на рис. 15, контактное кольцо пронизывается тем самым магнитным потоком, возможное индуктивное проявление которого и рассматривается. В таком случае вообще нельзя игнорировать контактное кольцо.[1] Наличие его не позволяет считать контур цепи гальванометра электрически неизменяемым. Этим обстоятельством и объясняется в данном случае кажущееся расхождение фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции, а также невозможность прямого применения максвелловской формулировки. Суть же дела состоит в том, что в реальной обстановке эксперимента отсутствуют какие бы то ни было пересечения магнитных линий проводником, а это пересечение представляет собою единственно необходимое и единственно достаточное условие возникновения индуктированной электродвижущей силы. Такова фарадеевская установка. Это именно и составляет содержание фарадеевской формулировки закона электромагнитной индукции.

Мысленно разрезая контактное кольцо *C* (рис. 15) около места присоединения к нему проводника, можно весь процесс непрерывного вращения катушки *A* условно разбить на отдельные этапы или периоды, каждый из которых соответствует одному полному обороту. Тогда в течение промежутка времени от момента прохождения под щеткой разреза в контактном кольце до следующего подобного же момента можно рассуждать так, как будто бы мы имеем электрически неизменяемый контур, и прилагать к нему формулировку Максвелла. В момент прохождения разреза под щеткой каждый указанный период заканчивается выключением или включением особого дополнительного витка, образуемого разрезанным контактным кольцом. Но во всяком случае подобное приложение формулировки Максвелла к рассматриваемому случаю (рис. 15) требует условного изменения в схеме и, кроме того, требует добавочных рассуждений. Руководствуясь же фарадеевской формулировкой, мы можем во всех без исключения случаях быстро и вполне правильно решить вопрос о том, будет ли индуктироваться электродвижущая сила в каком-либо замкнутом контуре, или нет. Если нет никакого пересечения магнитных линий проводником, то без всяких дальнейших рассуждений мы решаем, что процесса электромагнитной индукции не будет. В такого рода простоте рассмотрения вопроса, непосредственно в пределах данной схемы и без всякой необходимости прибегать к искусственным изменениям

[1] Игнорирование указанного обстоятельства может иногда приводить к не вполне правильным результатам при общем теоретическом рассмотрении процессов, происходящих в электромагнитных системах. Пример подобного рода недоразумений встречается в статье Poincaré „Sur quelques théorèmes généraux relatifs à l'électrotechnique" („Eclairage Electrique, 1907, t. L., № 9, pp. 293—301), где не оговорено, что речь идет только о контактных кольцах, не пронизываемых главным магнитным потоком. Выведенная Poincar теорема не может быть поэтому распространяема на все случаи электромагнитных систем.

или, иногда, добавлениям к схеме, — и заключается некоторое преимущество фарадеевской формулировки, которая обычно позволяет легко разбираться, особенно в случаях сложных и изменяющихся цепей.

§ 20. Общее заключение по поводу закона электромагнитной индукции

Резюмируя всё то, что было сказано выше о явлении электромагнитной индукции, можем сделать следующие выводы.

Фарадеевская и максвелловская (первая и вторая) формулировки закона электромагнитной индукции, которыми описывается количественная сторона этого явления, совершенно эквивалентны одна другой и тождественны в случае замкнутого контура, не подвергающегося никаким переключениям, явным или скрытым. Такой контур представляет собой, в полном смысле слова, *электрически неизменяемый контур* (см. § 19). Электрически неизменяемый контур нигде и никогда не претерпевает разрыва, и ни одна его часть никогда не замыкается накоротко, т. е. две различные точки контура никогда не соединяются электрически между собою. Однако свою геометрическую форму подобный контур может изменять сколь угодно сложным путем, оставаясь при этом неизменным как электрический контур.

Рассмотрение ряда частных примеров из области электромагнитной индукции, которому был посвящен предыдущий § 19, показывает, что могут быть случаи, когда есть возможность рассуждать так, как если бы мы имели дело с электрически неизменяемым контуром. При наличии всякого рода коллекторов, коммутаторов и контактных колец, если только они расположены в стороне от той части пространства, где находится главный магнитный поток и где совершается основной электромагнитный процесс, и если, в частности, контактные кольца не сцепляются с главным магнитным потоком, — есть полное основание трактовать в качестве частей электрически неизменяемого контура те участки цепи, которые подвергаются воздействию со стороны магнитного потока и действительно являются местом генерирования индуктированной электродвижущей силы. В отдельных случаях, когда эти части контура периодически замыкаются накоротко каким-либо внешним контактным органом, что бывает, например, в процессе коммутации при перекрывании щеткой двух смежных пластин коллектора, данные части контура мы можем считать на это время самодовлеющими электрически неизменяемыми контурами. Во всех указанных случаях совершенно равноправны обе формулировки закона электромагнитной индукции, фарадеевская или максвелловская. И мы обычно пользуемся той из них, которая представляется более удобной в зависимости от обстоятельств. Если нам легче проследить пересечения главного магнитного потока проводником, мы пользуемся фарадеевской формулировкой. Если же оказывается легче и проще учитывать величину магнитного потока, сцепляющегося с контуром электрической цепи, мы пользуемся максвелловской формулировкой. Результат от этого нисколько не зависит, так как обе эти формулировки характеризуются внутренним единством. Но всегда следует твердо помнить, что *реальной причиной возникновения индуктированной электродвижущей силы является тесный контакт соответствующего участка контура с магнитным потоком в процессе их относительного перемещения, а ни в коем случае не действие на расстоянии со стороны изменяющегося магнитного потока.*

Итак, фарадеевская формулировка закона электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

является ближе стоящей к существу описываемого физического процесса, и потому мы должны считать ее более универсальной, чем ее следствие, т. е. чем вторая формулировка, предложенная Максвеллом. Фарадеевская формулировка приложима совершенно независимо от того, есть ли какая-либо коммутация в рассматриваемой цепи, или нет. Во всех сложных случаях электромагнитной индукции тока, как уже было отмечено в § 19, мы обычно легко разбираемся, обращаясь к основной установке Фарадея, связанной с представлением о пересечении магнитных линий некоторой частью рассматриваемого контура. Если это пересечение имеет место, есть и процесс электромагнитной индукции. Если указанного пересечения нет, — нет и *не может быть* индуктированной электродвижущей силы, не может возникнуть индуктированный ток в замкнутом проводящем контуре.

Сказанное отнюдь не имеет целью умалить в какой-либо мере значение максвелловской формулировки

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

которая представляет собой совершенно точное выражение индуктированной электродвижущей силы, приложимое ко всем без исключения случаям электрически неизменяемой цепи. Весьма часто максвелловская формулировка оказывается при математическом анализе явлений даже более удобной, чем формулировка фарадеевская. Именно поэтому иногда стремятся, путем соответствующих изменений и условных дополнений, привести данную изменяющуюся цепь к такому виду, чтобы полученный контур допускал применение к нему формулировки Максвелла, хотя бы в течение некоторых промежутков времени, обычно повторяющихся периодически. Но всегда, во всех электромагнитных устройствах, в которых мы имеем дело с какими-либо изменениями в области распределения магнитного потока, внимательное рассмотрение схемы и анализ происходящего физического процесса неминуемо должны приводить нас и приводят к констатированию наличия относительного движения проводника и магнитных линий, т. е. к констатированию так называемого „пересечения“ их проводником. Это — необходимое следствие из принципа непрерывности магнитного потока.

В связи со сказанным полезно отметить, что при определении числа потокосцеплений (в процессе расчета некоторых электромагнитных устройств, например трансформаторов) речь в скрытом виде идет именно о количестве возможных пересечений магнитных линий контуром цепи. Действительно, число потокосцеплений есть не что иное, как число пересечений магнитных линий рассматриваемым сложным контуром, которое будет иметь место в случае, если данный контур и данный магнитный поток беспредельно удалятся один от другого, т. е. если они будут, так сказать, расцеплены. В этом, и именно только в этом, заключается физический смысл термина „потокосцепление“.

Во всяком случае, представление о пересечении магнитных линий проводником отнюдь не есть лишь „вспомогательное понятие“, как иногда могло бы показаться в случае, если бы мы еще недостаточно

полно восприняли всё, сделанное Фарадеем в области учения об электромагнитных явлениях. Наоборот, это есть основное исходное понятие, из которого в случае электрически неизменяемого контура вытекает, как следствие, максвелловская формулировка закона электромагнитной индукции.

§ 21. Энергия магнитного потока

а. Энергия магнитного потока имеет самую тесную связь с энергией электрического тока. В главе VI (§§ 47—49) мы познакомимся с общими соображениями Максвелла о природе энергии, которою обладает всякая система токов, и убедимся в том, что эта энергия играет большую роль в разного рода проявлениях магнитного потока.

Понятие о присущей магнитному потоку энергии занимает видное место в учении о магнитных явлениях вообще. В течение начального периода развития этого учения совершенно не уделялось внимания той среде, в которой происходят магнитные явления. Закон Кулона, как известно, оперирует с так называемыми магнитными массами, якобы расположенными на полюсах магнитов. Фиктивность подобных масс не подлежит теперь для нас никакому сомнению. В соответствии с доминирующей ролью идеи о магнитных массах и решение вопроса об энергии магнитных систем в рассуждениях первых исследователей связывалось с учетом этих масс подобно тому, как в учении об электрических явлениях вначале считалось, что вся энергия системы наэлектризованных тел сосредоточена в зарядах, расположенных на поверхности этих тел.

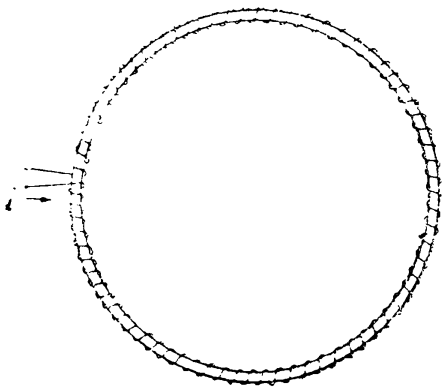


Рис. 16.

Работы Фарадея доказали, что энергия любой магнитной системы распределена по всему пространству, в котором обнаруживается магнитное поле. В настоящее время нет никаких сомнений в том, что энергия этого поля не сосредоточена в полюсах. Каждый элемент объема, занятого магнитным потоком, является носителем определенной части энергии магнитного поля. В нижеследующих строках дан простейший вывод соотношения, характеризующего магнитный поток в отношении обусловленного им запаса энергии.

Рассмотрим случай, когда магнитное поле можно считать однородным. Представим себе сколь угодно тонкий кольцевой соленоид с равномерно распределенной обмоткой, состоящей из w витков, очень густо наложенных, так, чтобы можно было считать всё магнитное поле сосредоточенным внутри сердечника этого соленоида (рис. 16). При этом каждая магнитная линия будет сцепляться со всеми витками обмотки. Пусть s есть нормальное сечение сердечника, l — его длина и μ — магнитная проницаемость вещества, из которого состоит сердечник. Предположим, что μ есть величина постоянная и что вещество однородно и изотропно.

На основании закона сохранения энергии мы можем утверждать, что энергия магнитного потока, появляющегося внутри соленоида при возникновении в его обмотке некоторого тока i, равна работе, совершенной внешним генератором при установлении этого тока и пошедшей именно на образование магнитного потока. Рассчитаем эту работу.

Обозначим через Ф реально существующий в сердечнике соленоида поток самоиндукции. Число потокосцеплений или полный магнитный поток самоиндукции выразится так:

$$\Phi' = \Phi w.$$

Во время процесса установления тока i в каждый момент будет справедливо следующее соотношение:

$$e = ri + \frac{d\Phi'}{dt},$$

или

$$e = ri + w\frac{d\Phi}{dt},$$

где e есть внешняя электродвижущая сила, приложенная к концам обмотки соленоида, ri — часть этой электродвижущей силы, расходуемая на нагревание проводника обмотки, и последнее слагаемое представляет собою ту часть внешней электродвижущей силы, которая преодолевает обратную электродвижущую силу самоиндукции и идет на образование потока Ф. Умножая обе части последнего равенства на idt, получаем

$$dW = eidt = ri^2\,dt + wid\Phi,$$

где dW есть полный расход энергии, производимый электрическим генератором за бесконечно малый промежуток временм dt, $ri^2\,dt$ — джоулево тепло и $wid\Phi$ — элементарная работа генератора за тот же промежуток времени dt, последовательно накопляемая в форме энергии магнитного потока Ф. Нас интересует вторая составляющая энергии, расходуемой в рассматриваемой системе. Обозначая эту составляющую через dW_m, имеем

$$dW_m = wid\Phi.$$

Так как можно написать

$$\Phi = Bs,$$

где B — магнитная индукция в сердечнике соленоида, и кроме того в рационализированной системе единиц будет

$$wi = \oint Hdl = Hl,$$

где H — магнитная сила внутри соленоида, а интегрирование ведется вдоль контура некоторой магнитной линии, то получаем

$$dW_m = lsHdB.$$

Интегрируя это выражение в пределах от нуля до некоторого частного значения B и принимая при этом во внимание соотношение

$$\mu = \frac{B}{H} = \text{Const},$$

приходим к такому значению энергии рассматриваемого магнитного потока:

$$W_m = \frac{1}{2}ls\frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2}ls\mu H^2 = \frac{1}{2}lsBH.$$

Величина $ls = v$ есть объем пространства, занятого магнитным потоком. Следовательно, объемная плотность энергии магнитного потока выражается так:

$$W'_m = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \mu H^2.$$

Мы получили это выражение, впервые установленное Максвеллом, рассматривая случай однородного магнитного поля. Но совершенно очевидно, что и в случае какого угодно неоднородного поля в пределах бесконечно малого объема мы можем рассматривать поле в качестве однородного, а потому полученное выражение для плотности энергии магнитного потока остается справедливым при любом распределении потока. Таким образом, энергия магнитного потока в среде изотропной и при постоянной магнитной проницаемости вообще всегда имеет следующую величину:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v BH dv,$$

где интегрирование распространяется по всему объему, занятому магнитным потоком.

В случае среды анизотропной векторы B и H не совпадают по направлению и, как показал Максвелл, последнее выражение принимает следующий вид:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v BH \cos \alpha \, dv,$$

где α есть угол между векторами B и H.

Наконец, в случае ферромагнитных материалов, когда в связи с явлением гистерезиса и сложностью происходящих в них магнитных процессов магнитная проницаемость не может рассматриваться как величина постоянная, вопрос об энергии магнитного потока требует особого рассмотрения с учетом так называемых магнитных потерь. Всё это относится к области учения о ферромагнитных материалах, и мы здесь не будем останавливаться на данном специальном случае. При общем же рассмотрении свойств и проявлений магнитного потока будем предполагать, что имеем дело с изотропной средой, обладающей постоянной магнитной проницаемостью.

б. Остановимся теперь на энергии, которая присуща каждой отдельной магнитной линии, т. е. единичной трубке магнитной индукции. Так как магнитный поток мы рассматриваем состоящим из трубок магнитной индукции, условно называемых магнитными линиями, то совершенно естественно считать энергию всего магнитного потока соответствующим образом распределенной между магнитными линиями. Подсчитаем теперь эту энергию одной магнитной линии.

Магнитный поток, пронизывающий любое нормальное сечение s' единичной трубки магнитной индукции, согласно условию, выражается так:

$$\Phi_1 = \mu H s' = 1.$$

Элемент объема этой трубки $dv = s' dl$ содержит магнитную энергию

$$\frac{1}{2} \mu H^2 dv = \frac{1}{2} \mu H^2 s' dl.$$

Следовательно, в объеме всей единичной трубки заключается энергия

$$W_1 = \frac{1}{2}\oint \mu H^2 s'\, dl = \frac{1}{2}\oint \mu H s' \cdot H dl.$$

Так как $\mu H s' = 1$, то

$$W_1 = \frac{1}{2}\oint H dl,$$

что на основании закона магнитодвижущей силы можем написать в следующем виде:

$$W_1 = \frac{1}{2} i.$$

Итак, энергия, которою обладает единица магнитного потока, т. е. одна магнитная линия, численно выражается половиною силы тока, сцепляющегося с рассматриваемым магнитным потоком.

в. Пользуясь только что выведенным соотношением, подсчитаем энергию потока самоиндукции, связанного с контуром некоторого тока i. Величина Φ_s', полный поток самоиндукции, представляет собой, как мы указывали уже выше, число сцеплений реально существующего потока Φ_s с данным контуром тока. Мы различаем эти две физические величины, называя Φ_s' *полным потоком самоиндукции*, а Φ_s — просто потоком самоиндукции. Лишь в частном случае простейшего контура, состоящего из одного витка, имеет место соотношение

$$\Phi_s' = \Phi_s.$$

Если же контур включает в себе ряд витков, из чисто геометрических соображений следует, что всегда

$$\Phi_s' > \Phi_s.$$

Как известно, существует соотношение

$$\Phi_s' = Li,$$

где L есть коэффициент самоиндукции (индуктивность) контура.

Рассмотрим самый общий случай, когда имеется сколь угодно сложный контур тока. Допустим сначала, что сила тока в контуре равна единице и что при этом k_1 магнитных линий реально существующего потока самоиндукции сцепляется с w_1 витками, k_2 магнитных линий — с w_2 витками, k_3 магнитных линий — с w_3 витками и т. д.

Если же сила тока равна i, то пропорционально силе тока изменяется и поток самоиндукции, т. е. в таком случае

$k_1 i$ магнитных линий сцепляется с током $w_1 i$,
$k_2 i$ магнитных линий сцепляется с током $w_2 i$,
$k_3 i$ магнитных линий сцепляется с током $w_3 i$

и т. д.

Принимая во внимание данное выше соотношение, выражающее энергию одной магнитной линии, получаем:

$k_1 i$ магнитных линий обладают энергией, равной $\frac{1}{2} k_1 w_1 i^2$,

$k_2 i$ магнитных линий обладают энергией, равной $\frac{1}{2} k_2 w_2 i^2$,

$k_3 i$ магнитных линий обладают энергией, равной $\frac{1}{2} k_3 w_3 i^2$

и т. д.

А все магнитные линии потока самоиндукции являются носителями запаса энергии

$$W = \frac{1}{2}\left(k_1 w_1 + k_2 w_2 + k_3 w_3 + \cdots\right) i^2.$$

Но выражение, стоящее здесь в скобках, есть число сцеплений потока самоиндукции с рассматриваемым контуром при силе тока в нем, равной единице, т. е. это есть как раз коэффициент самоиндукции L:

$$k_1 w_1 + k_2 w_2 + k_3 w_3 + \cdots = L.$$

Следовательно, окончательно можем написать:

$$W = \frac{1}{2} L i^2.$$

С другой стороны, на основании сказанного выше об энергии всякого магнитного потока имеем

$$W_m = \frac{1}{2}\int_v BH\, dv.$$

Таким образом, для энергии потока самоиндукции получаем

$$\frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2}\int_v BH\, dv,$$

где интегрирование распространяется по всему объему, занятому рассматриваемым потоком самоиндукции.

Левая часть вышенаписанного равенства выражает собой, как известно, энергию тока i, контур которого обладает коэффициентом самоиндукции L (см. § 49 Главы VI). Таким образом, мы можем сказать, что *энергия тока в точности равна магнитной энергии, носителем которой является поток самоиндукции.*

§ 22. Проявления инерции магнитного потока. Принцип сохранения магнитного потока

а. В самой тесной связи с явлением электромагнитной индукции стоит одно чрезвычайно важное свойство магнитного потока. Оно состоит в следующем. Магнитный поток всегда ведет себя так, что ему можно приписать некоторого рода *инерцию*. Благодаря этой инерции магнитный поток как бы сопротивляется всякому его приращению или уменьшению. Это выражается в противодействии изменениям потока со стороны охватывающей его электрической цепи, в которой возникает ток под влиянием индуктированной электродвижущей силы.

Поясним сказанное, прибегнув с этой целью к аналогии из области механики. Вообще, при рассмотрении разного рода закономерностей, наблюдаемых в определенной группе явлений природы, бывает весьма полезно учитывать сходственные закономерности, характеризующие какую-либо иную группу явлений. Это может в значительной степени облегчить изучение существенных особенностей данной группы явле-

ний. Недаром еще Ньютон обратил внимание на это и в своих „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", касаясь методов научного исследования, между прочим, говорит: „... не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда и проста и всегда сама с собой согласна".[1]

6. Что касается электрического тока, то не подлежит какому-либо сомнению чисто кинетический характер этого явления. Интенсивность кинетического процесса, происходящего в электрической цепи, мы обычно выражаем силой тока, которую принято понимать как скорость протекания электричества через поперечное сечение цепи, так что имеем:

$$i = \frac{dq}{dt},$$

где q есть количество протекающего электричества. Вообще говоря, совершенно независимо от наших конкретных представлений о сущности электрического тока, мы имеем достаточно оснований для того, чтобы приписывать силе тока характер какой-то скорости.

В качестве простейшей аналогии из области механики можно было бы ограничиться случаем материальной точки, движущейся прямолинейно. Для тех целей, которые мы сейчас преследуем, этого было бы достаточно.[2] Однако представляется целесообразным сразу же сосредоточить внимание на несколько более сложном случае, который по своему общему характеру, повидимому, полнее соответствует действительной природе электромагнитного процесса, протекающего в цепи тока. Об этом же случае будет еще речь в § 57 Главы VI, специально посвященной вопросу о природе электрического тока.

Итак, в качестве механического аналога тому, что совершается в цепи тока, рассмотрим какое-либо твердое тело, которое вращается вокруг неподвижной оси, проходящей через его центр инерции.

Скорость вращения тела (ω) выражается производной по времени от угла его поворота

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt},$$

где α есть угол.

Сопоставление вышеприведенных двух соотношений дает нам первую сходственность между явлениями в электрической цепи и в механической системе: и в том и в другом случае явление прежде всего характеризуется скоростью происходящего процесса. Как ни элементарна эта аналогия, но в основном именно она в связи с тем фактом, что в обоих случаях рассматриваемые системы оказываются носителями известного запаса энергии, присущей им только благодаря совершающемуся в них какому-то движению, позволила Максвеллу построить его динамическую теорию электромагнитизма (см. §§ 47—49 Главы VI).

В предыдущем § 21 было указано, что энергия магнитного поля вокруг проводника с током, т. е. энергия потока самоиндукции, выражается величиной

$$\frac{1}{2} Li^2.$$

---

[1] Приведенные слова Ньютона взяты из книги III указанного его труда, из раздела „Regulae philosophandi" (Правила умозаключений в физике); см. пояснения к третьему правилу. Цитировано по переводу акад. А. Н. Крылова („Математические начала естественной философии". Собр. соч. акад. А. Н. Крылова, т. VII, Ленинград, 1936).

[2] См. Миткевич. Физические основы электротехники. 1933, стр. 116—119.

Это и есть количество энергии, связанной с данной электрической цепью и обусловленной тем, что по ней протекает ток i.

С другой стороны, мы знаем, что кинетическая энергия вращающегося тела равна величине

$$\frac{1}{2} I\omega^2,$$

где I есть момент инерции тела.

Последние два выражения совершенно аналогичны одно другому. Силе тока i соответствует угловая скорость ω, коэффициенту самоиндукции L — момент инерции I, энергии потока самоиндукции $\frac{1}{2} Li^2$ — кинетическая энергия $\frac{1}{2} I\omega^2$, потоку самоиндукции $Li = \Phi_s$ соответствует момент количества движения $I\omega$.

Известно, что в материальной системе момент количества движения как бы стремится сохранить свою величину. В случае изолированной системы, в которой отсутствуют сопротивление среды и вообще какие бы то ни было силы трения, могущие вызвать рассеяние энергии, сохранение момента количества движения полностью осуществляется. Рассматриваемая аналогия наводит нас на мысль, что и в электромагнитной системе должно иметь место нечто подобное, т. е. что магнитный поток, сцепляющийся с проводящим контуром, также должен стремиться сохранить свою величину. Не трудно убедиться в том, что на самом деле это и происходит.

Если в механической системе изменять момент количества движения, воздействуя на нее каким-либо внешним вращающим моментом R, то со стороны инерции системы проявляется противодействие подобному изменению общих условий движения. Исходя из идей Даламбера, это противодействие можно истолковать как возникновение в данной системе реакции в форме, так сказать, внутреннего вращающего момента (R_D), который равен по абсолютной величине и обратен по знаку внешнему вращающему моменту (R). Как известно, этот внутренний вращающий момент R_D, обусловленный даламберовскими силами инерции, будет выражаться так:

$$R_D = -\frac{d(I\omega)}{dt}.$$

В электромагнитной системе при всяких попытках изменить магнитный поток Φ_s, сцепляющийся с каким-нибудь контуром, в последнем возникает электромагнитная реакция в виде электродвижущей силы самоиндукции e_s, причем величина ее будет

$$e_s = -\frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\Phi_s}{dt}.$$

Электродвижущая сила самоиндукции по форме и по своему действию, а также, быть может, и по своей природе аналогична даламберовскому вращающему моменту. Действительно, в механической системе даламберовский вращающий момент выражается взятой с обратным знаком производной по времени от момента количества движения. В электромагнитной системе электродвижущая сила самоиндукции соответственно выражается через взятую с обратным знаком производную по времени от магнитного потока $\Phi_s = Li$, имеющего характер чего-то, аналогичного

моменту количества движения. И затем на ряде примеров мы можем подтвердить, что подобно тому, как даламберовские силы инерции противодействуют всякому изменению момента количества движения в механической системе, электродвижущая сила самоиндукции имеет стремление противодействовать всякому изменению потока самоиндукции, связанного с проводящим контуром. Это положение справедливо в самом общем случае.

Как только магнитный поток Φ_s начинает претерпевать какое-либо изменение в своей величине, например в связи с усилением или ослаблением тока, протекающего по данному контуру, тотчас же возникает электродвижущая сила самоиндукции. При этом, если

$$\frac{d\Phi_s}{dt} > 0,$$

то

$$e_s < 0.$$

Обратно, если

$$\frac{d\Phi_s}{dt} < 0,$$

то

$$e_s > 0.$$

Таким образом, электродвижущая сила самоиндукции всегда обратного знака по отношению к изменениям магнитного потока Φ_s. Она стремится так изменить ток, чтобы ослабить или замедлить изменения магнитного потока, сцепляющегося с контуром.

Снова обращаясь к рассматриваемой материальной системе, отметим еще, что в случае отсутствия сопротивлений и трений, могущих тормозить вращение системы, внешний вращающий момент

$$R = \frac{d(I\omega)}{dt} = -R_D$$

расходуется лишь на преодоление даламберовских сил инерции системы. В случае же, если, кроме сил инерции, внешний вращающий момент R встречает противодействие со стороны сопротивления среды или каких-либо трений, то часть момента R расходуется на преодоление этих сопротивлений, и только остальная часть — на преодоление инерции данной вращающейся системы.

Соответственно этому, в цепи тока действующая в ней внешняя электродвижущая сила частью расходуется на тепловые процессы, обусловленные наличием сопротивления r, частью же может компенсировать обратную электродвижущую силу самоиндукции. В связи с этим в соотношении

$$e' = \frac{d(Li)}{dt} = \frac{d\Phi_s}{dt} = -e_s$$

e' представляет собой остаток внешней электродвижущей силы e за вычетом части (ri), расходуемой на преодоление сопротивления r.

Сказанное о потоке самоиндукции справедливо и вообще в отношении всякого магнитного потока. Никакой магнитный поток немыслим без охватывающих его контуров, в одних из которых уже идет электрический ток, в других же — ток может возникнуть в процессе изменений магнитного потока.

Во всех без исключения случаях имеем

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

и поэтому всякую электродвижущую силу индукции мы можем трактовать в качестве электромагнитного аналога даламберовских сил инерции.

Итак, *в процессах, связанных с изменениями магнитного потока, мы встречаемся с далеко идущей аналогией между электромагнитной и механической системами, каждая из которых обнаруживает свойство своего рода инерции.*

в. Возникает вопрос: если магнитному потоку принципиально присуще свойство инерции, выражающееся в его стремлении сохранять свою величину, то каким же образом возможно все-таки изменить величину потока, сцепляющегося с некоторым проводящим контуром? Та же самая механическая аналогия позволяет нам разъяснить этот вопрос. В механической системе мы можем изменить момент количества движения и даже совершенно остановить вращение тела, используя, например, сопротивление среды, которое вызывает рассеяние энергии. Подобно этому и в системе электромагнитной, т. е. в цепи электрического тока, благодаря наличию сопротивления проводников, обусловливающего возникновение джоулева тепла, мы можем изменить величину магнитного потока, охватываемого замкнутым проводящим контуром, и даже полностью устранить магнитный поток, сцепляющийся с данным контуром тока.

Мы знаем, однако, что в случае вращающегося по инерции тела, предоставленного самому себе, и при совершенном отсутствии тормозящих сопротивлений, момент количества движения сохраняется постоянным (и это постоянство момента количества движения строго соблюдается даже тогда, когда в конфигурации данной системы происходят какие-либо изменения под влиянием сил, суммарный момент которых относительно оси вращения равен нулю). Точно так же и магнитный поток, сцепляющийся с каким-либо проводящим контуром, сохраняется строго постоянным, причем величина его никак не может быть изменена, например, путем деформирования контура тока, если электрическое сопротивление этого контура равно нулю, т. е. если проводники данной цепи лишены способности рассеивать энергию тока, превращая ее в тепло. Такого рода проводники, для которых

$$r = 0,$$

принято называть *сверхпроводниками.* В специальных условиях они действительно могут быть осуществлены и в настоящее время всесторонне изучаются на непосредственном опыте. О сверхпроводниках вообще и о поведении магнитного потока в случае сверхпроводящих цепей мы будем подробнее говорить в Главе VI, при рассмотрении вопроса о природе электрического тока (§§ 50—53). Здесь же ограничиваемся лишь констатированием того несомненно установленного факта, что магнитный поток, охватываемый замкнутым сверхпроводящим контуром, всегда сохраняет свою величину, т. е. при указанных условиях неизменно будет:

$$\Phi = \text{Const}.$$

Это соотношение мы можем рассматривать в качестве формулировки *принципа сохранения магнитного потока.*

Необходимо иметь в виду, что вышеприведенная формулировка принципа сохранения магнитного потока безоговорочно применима только в случае сверхпроводящих цепей.

В случае же обычных цепей с конечным сопротивлением ($r \neq 0$) указанный принцип, имеющий, повидимому, очень важное значение во всех вообще электромагнитных процессах, должен быть понимаем в настоящее время несколько иначе, так как мы пока еще не располагаем достаточно достоверными данными, которые позволяли бы нам утверждать, что он всегда выражается в столь категорической форме:

$$\Phi = \text{Const.}$$

Однако внимательное рассмотрение свойств и проявлений магнитного потока в самых разнообразных условиях приводит нас к заключению, что принцип сохранения магнитного потока все-таки до известной степени соблюдается, хотя бы и в ограниченной форме.

Как мы увидим далее в Главе VI (§§ 49 и 58—61), есть некоторое основание предполагать, что исчезновение магнитного потока, сопряженного с обычной цепью электрического тока, является только кажущимся и что в действительности происходит лишь преобразование его в формы микрофизического масштаба. Мыслимы и другие направления возможных преобразований магнитного потока, например слияние двух обособленных магнитных линий в один общий контур (см. §§ 26—31 Главы IV). Во всяком случае представляется очень вероятным, что в некоторой замкнутой и совершенно изолированной от всего прочего системе магнитный поток никогда не может полностью исчезнуть и никогда не становится меньше какой-то определенной величины, отличающейся от нуля. В связи со сказанным, впредь до выяснения ряда деталей, которые относятся к различным видам преобразований магнитного потока, еще недостаточно изученным, *принцип сохранения магнитного потока в общей форме может быть выражен следующим соотношением*:

$$\Phi > 0.$$

Иными словами, *в некоторой замкнутой изолированной системе какие бы процессы в ней ни происходили, магнитный поток всегда принципиально сохраняется в том или ином виде, причем возможно, что в количественном отношении он и претерпевает изменения.*

г. Как было только что отмечено, в обычной обстановке, вследствие наличия конечного электрического сопротивления ($r \neq 0$) и обусловленного им рассеяния энергии, мы встречаемся с возможностью изменений магнитного потока, сцепляющегося с каким-либо проводящим контуром. Однако в некоторых специальных условиях этот магнитный поток сохраняет свою величину даже при сопротивлении цепи, не равном нулю. Подобный пример проявления принципа сохранения магнитного потока мы имеем в так называемом *флюксметре*, который представляет собой прибор, позволяющий в высокой степени просто и удобно осуществлять всякого рода магнитные измерения.

Флюксметр обычно строится по типу баллистического гальванометра с подвижной катушкой между полюсами неподвижного магнита, но только при этом доводят до пренебрежимо малой величины момент кручения в подвесе, поддерживающем подвижную часть системы, и по возможности устраняют вообще всякие силы трения, которые тормозили бы движение этой части. Она должна находиться в состоянии безразличного

равновесия совершенно независимо от угла ее поворота. Во время пользования флюксметром к нему присоединяют внешнюю цепь, которая обычно состоит из большего или меньшего количества витков проволоки, чаще всего в виде особой катушки, по своим размерам и форме соответствующей задачам производимого магнитного измерения. Таким образом, создается замкнутая цепь флюксметра. Если теперь внести наружную катушку во внешнее магнитное поле или вообще как-либо создать внешний магнитный поток Φ_2, пронизывающий эту катушку, то в рассматриваемой замкнутой цепи возникнет индуктированный ток, под влиянием которого произойдет некоторый поворот подвижной части флюксметра, причем соответственно изменяется число сцеплений витков этой подвижной части с магнитным потоком Φ_1 внутри данного прибора. Угол этого поворота будет полностью определяться числом сцеплений наружного участка замкнутой цепи флюксметра с измеряемым внешним магнитным потоком. Всегда в описываемых условиях изменение числа потокосцеплений внутри прибора будет обратным по знаку числу внешних потокосцеплений. При правильной конструкции флюксметра оказывается возможным достигнуть того, что полный магнитный поток, сцепляющийся со всем рассматриваемым проводящим контуром, будет сохраняться постоянным, т. е. в данном случае будет соблюдаться соотношение

$$\Phi = \text{Const.}$$

Следовательно, если шкала флюксметра предварительно проградуирована надлежащим образом, то при помощи его можно производить измерение внешнего потока, пронизывающего наружную часть цепи прибора.

Чтобы убедиться в том, что флюксметр действительно может выполнять вышеуказанные функции, рассмотрим несколько подробнее происходящие в нем процессы.

Прежде всего отметим одно обстоятельство, имеющее весьма существенное значение для достижения вполне удовлетворительной работы флюксметра. Именно, его подвижная катушка должна находиться в равномерно радиальном поле, т. е. во всех участках междужелезного пространства внутри прибора это магнитное поле должно оставаться одним и тем же. В таком случае момент пары сил электромагнитного взаимодействия указанного поля и тока, протекающего через подвижную катушку, совершенно не будет зависеть от угла поворота катушки, а только от силы тока i. Речь, конечно, идет об угле поворота в известных пределах, соответствующих шкале флюксметра и определяемых его общей конструкцией.

Обозначим через l и a длину и ширину прямоугольной рамочки-катушки, а через w_1 — число витков в этой рамочке. Тогда вращающий момент пары сил взаимодействия тока i с радиальным полем в междужелезном пространстве (при магнитной индукции B) может быть выражен следующим образом:

$$M = w_1 la Bi.$$

Принимаем теперь во внимание, что тормозящим моментом от пары кручения подвеса, от трения о воздух и т. п. можно пренебречь в виду его чрезвычайно малой величины и что магнитную индукцию B можем считать постоянной. При этих условиях результирующий импульс пары

сил, действующих на рамочку в течение некоторого определенного промежутка времени, сведется к выражению

$$\int_0^t w_1 la\, B i dt = w_1 la\, B \int_0^t i dt.$$

Этот импульс должен быть равен приращению момента количества движения за тот же промежуток времени от 0 до t. Изберем в качестве пределов интегрирования момент начала движения рамочки и момент ее остановки после того, как всякие изменения в рассматриваемой электромагнитной системе закончились. Так как в обоих крайних положениях рамочка находится в покое, то приращение момента количества движения равно нулю и, следовательно, можем написать

$$w_1 laB \int_0^t i dt = 0,$$

на основании чего имеем

$$\int_0^t i dt = 0.$$

Отсюда получаем

$$q = 0,$$

т. е. полное количество электричества, протекшее по цепи за время отклонения рамочки флюксметра, равно нулю. Это показывает нам, что по виткам рамочки последовательно протекали токи в двух противоположных направлениях.

Обратимся к основному закону электромагнитной индукции, данному Фарадеем. Представим его в виде

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{r},$$

где через $\Delta\Phi$ обозначено полное число пересеченных контуром тока магнитных линий, т. е. приращение числа сцеплений данного контура с некоторым магнитным потоком Φ.

В случае, о котором идет речь, имеем

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{r} = 0,$$

откуда вытекает

$$\Delta\Phi = 0.$$

Но полное изменение магнитного потока, сцепляющегося с замкнутой цепью флюксметра, составляется из двух частей

$$\Delta\Phi'_1 = w_1 \Delta\Phi_1$$

и

$$\Delta\Phi'_2 = w_2 \Delta\Phi_2,$$

где w_2 есть число витков в наружной катушке измерительной цепи, а через $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ обозначены приращения реально существующих магнитных

потоков, которые охватываются подвижной рамочной катушкой внутри флюксметра, с одной стороны, и витками наружной катушки, с другой стороны. На основании сказанного можем написать:

$$\Delta\Phi = w_1 \Delta\Phi_1 + w_2 \Delta\Phi_2 = 0.$$

Таким образом, получаем окончательно

$$\Phi = \text{Const.},$$

т. е. полный магнитный поток, сцепляющийся с проводящим контуром флюксметра, остается неизменным, несмотря на производимые изменения в расположении частей этого контура относительно внешнего магнитного поля. *В описанных условиях с большой степенью точности соблюдается принцип сохранения магнитного потока.*

Из последних соотношений следует

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{w_1 \Delta\Phi_1}{w_2}.$$

Обычно шкала флюксметра градуируется таким образом, что положение стрелки прибора непосредственно дает величину $w_1 \Delta\Phi_1$, считая от начального положения стрелки. Обозначая число максвеллов, соответствующих одному делению шкалы, через φ и через α — число делений шкалы, на которое стрелка переместилась в процессе измерения $\Delta\Phi_2$, получаем

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{1}{w_2}\varphi\alpha.$$

Так как в действительности тормозящий момент вредных механических сопротивлений, сколь бы мал он ни был, не является абсолютно равным нулю, то для возможного уменьшения погрешностей, проистекающих отсюда при измерениях с помощью флюксметра, его цепь должна иметь минимальное электрическое сопротивление. Это сделает основной момент электромагнитной пары сил во много раз большим вредного тормозящего момента, что и дает нам право практически пренебрегать тормозящим моментом.

Итак, в случае флюксметра, хотя электрическая цепь его и обладает сопротивлением, не равным нулю, всё же магнитный поток, охватываемый контуром этой цепи, после всякого рода изменений в системе в конце концов сохраняет ту же величину, что было и в начале. Если нарастание потока Φ_2 происходит достаточно медленно, то можно показать, что полный магнитный поток, сцепляющийся с данным контуром, практически всё время сохраняет свою величину. Если же нарастание потока Φ_2 происходит чрезвычайно быстро, как бы мгновенно, то принцип сохранения магнитного потока находит свое выявление через посредство инерции материальных частей электромагнитной системы, благодаря чему восстанавливается первоначальная величина потока, сцепляющегося с рассматриваемым проводящим контуром.

Как видно из всего вышеизложенного, флюксметр представляет интерес не только в качестве весьма полезного измерительного прибора. При функционировании его мы встречаемся с очень наглядной иллюстрацией принципа сохранения магнитного потока. Следует особо отме-

тить, что рассмотренное свойство флюксметра было констатировано еще до того, как были открыты сверхпроводящие цепи, при наличии которых указанный принцип осуществляется в наиболее совершенной форме.

§ 23. Механические проявления магнитного потока

а. Отдельные части какой-либо системы, связанной с магнитным полем, испытывают разного рода механические воздействия со стороны того специфического процесса, который происходит в этом поле. Так, к полюсам магнитов оказываются приложенными механические силы, стремящиеся их перемещать в том или ином направлении, в результате чего наблюдаются притяжения разноименных полюсов и отталкивания одноименных полюсов. Проводник, по которому течет электрический ток, находясь во внешнем магнитном поле, испытывает стремление двигаться поперек данного поля. Два тока, протекающих по проводникам, находясь в магнитном поле, органически связанном с этими же токами, испытывают силы механического взаимодействия и стремятся притянуться или оттолкнуться один от другого, а также вообще изменить взаимное расположение в зависимости от направления этих токов и т. д.

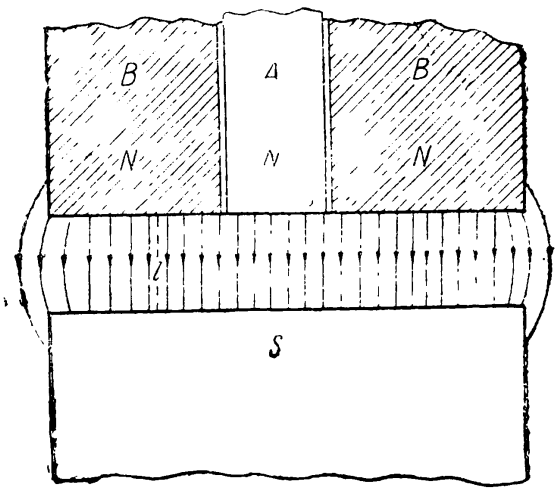


Рис. 17.

Совершенно естественны попытки как-то объяснить все подобные механические проявления магнитного поля особыми свойствами магнитного потока и составляющих его магнитных линий. Сам Фарадей именно так и рассуждал. В его представлении „физические силовые линии“ магнитного поля, т. е. магнитные линии, уподоблялись каким-то упругим нитям, которые стремятся сократиться и в системе которых существует боковой распор. Несомненно то, что такого рода свойства магнитных линий могут весьма просто объяснить все известные механические проявления магнитного потока.

Максвелл, подвергший тщательному математическому обследованию все свойства магнитного поля, показал путем анализа и в полном согласии с воззрениями Фарадея, что в магнитном поле действительно должны возникать механические напряжения, которые и будут производить соответствующие механические воздействия на все обычные материальные тела, находящиеся в поле.[1] В общем случае какой угодно среды выражения для этих сил приобретают сравнительно сложный вид. Мы ограничимся рассмотрением простейшего случая однородной изотропной среды, для которой интересующие нас соотношения могут быть получены путем весьма элементарных рассуждений.

б. Представим себе (рис. 17) два сближенных разноименных полюса N и S двух магнитов цилиндрической формы. Допустим, что противолежащие полюсные поверхности параллельны и находятся на небольшом расстоянии l одна от другой. В центральной части щели между полю-

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, 3266, 3267, 3268, 3295.
Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, §§ 641—645.

сами N и S магнитное поле будет более или менее однородно, т. е. магнитные линии будут итти нормально к поверхности полюсов в виде пучка параллельных прямых с некоторой определенной густотой их распределения в пространстве. По мере приближения к краям полюсных поверхностей магнитные линии приобретают всё большее и большее искривление, как это показано на рис. 17. Предполагая отношение диаметра полюсной поверхности к расстоянию l между полюсами сколь угодно большим, можно считать магнитное поле в центральной части в высокой степени равномерным. Для полной строгости наших рассуждений допустим, что из северного полюса N вырезана средняя цилиндрическая часть A сравнительно небольшого диаметра и с торцевой поверхностью s. Эта часть A оказывается, таким образом, окруженной со всех сторон полым цилиндром BB, представленным на рис. 17 в разрезе и играющим роль своего рода „охранного кольца“.[1] Предположим, наконец, что полюс S и охранный полый цилиндр BB прочно закреплены и может перемещаться только часть A, скользя вдоль полости, в которой она находится.

Под влиянием притяжения полюсов N и S часть A будет стремиться выдвинуться за пределы плоскости, ограничивающей полюс N, и приблизиться к полюсу S. Определим величину силы тяжения, приложенной к торцевой поверхности s части A.

Обозначим через f' силу тяжения, действующую на единицу поверхности, а через f — силу, действующую на всю площадку s. Тогда

$$f = f' s.$$

Предположим, что под влиянием этих сил тяжения центральная цилиндрическая часть A сместилась в направлении полюса S на бесконечно малую величину dl. Такое смещение будет сопровождаться соответствующим изменением количества энергии магнитного потока в объеме sl, так как работа перемещения за отсутствием других источников энергии может быть произведена лишь за счет энергии потока. Действительно, объем магнитного поля в промежутке между поверхностью s части A и соответствующей поверхностью полюса S становится меньше, и в связи с этим запас энергии магнитного потока в этом объеме должен в известной степени уменьшиться.

Пользуясь приведенным в § 21 выражением для плотности энергии магнитного потока и пренебрегая бесконечно малыми высших порядков, получим, что при перемещении цилиндрической части A на элемент dl в механическую работу преобразуется бесконечно малая доля энергии магнитного потока, равная

$$\frac{1}{2} BH\, s\, dl.$$

С другой стороны, та же работа может быть выражена так:

$$f\, dl = f'\, s\, dl.$$

Следовательно, можем написать

$$f'\, s\, dl = \frac{1}{2}\, BH\, s\, dl,$$

[1] Аналогичное охранное кольцо применено в абсолютном электрометре В. Томсона (Кельвина).

откуда получаем:

$$f' = \frac{1}{2} BH.$$

Мы определили величину силы тяжения, действующей на единицу поверхности полюса, к которому, так сказать, „присосались" магнитные линии. С той точки зрения, согласно которой представление о магнитных линиях имеет непосредственное отношение к структуре реально существующего магнитного потока, необходимо заключить, что такая же сила тяжения имеет место и для любого поперечного сечения потока, иными словами, что магнитные линии в отношении их механических проявлений действительно аналогичны растянутым упругим нитям и обладают продольным тяжением по всей своей длине.

Предполагая, что среда, в которой мы рассматриваем магнитные линии, обладает постоянной магнитной проницаемостью и сохраняя то же обозначение f' вообще для силы тяжения магнитных линий, отнесенной к единице поверхности, можем на основании сказанного выше написать

$$f' = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}.$$

Итак, *сила продольного тяжения магнитных линий, отнесенная к единице поверхности нормального сечения магнитного потока, численно выражается так же, как энергия магнитного потока, отнесенная к единице объема.*

в. Что касается бокового распора, существующего в системе магнитных линий, то уже из простого рассмотрения рис. 17 наличие подобного распора ясно вытекает. Действительно, у краев торцевых полюсных поверхностей заметно сильное искривление магнитных линий. Это может быть объяснено по существу, а не методом чисто формальных рассуждений, только тем обстоятельством, что магнитные линии, находящиеся в промежутке между полюсами N и S, оказывают боковое давление на магнитные линии у краев, в направлении изнутри наружу, и заставляют их искривиться. Обратно, конечно, эти внешние магнитные линии должны производить давление на магнитные линии средней части потока, исходящего из полюса N и входящего в полюс S. Такое взаимное воздействие одних магнитных линий на другие мы и называем боковым распором. Поскольку вся совокупность магнитных линий, входящих в состав того или иного потока, образует единое целое, части которого должны находиться в некотором равновесном состоянии, необходимо рассматривать боковой распор магнитных линий не как что-то самостоятельное, а лишь как одно из проявлений состояния механического напряжения, имеющего место в объеме, занятом магнитным потоком. С этой точки зрения мы и подойдем к вопросу о боковом распоре магнитных линий.

Из вышеприведенного выражения для продольного тяжения магнитных линий

$$f' = \frac{1}{2} BH$$

следует, что тяжение каждой отдельной магнитной линии, т. е. тяжение одной единичной трубки магнитной индукции, выразится соотношением

$$f_m = \frac{f'}{B} = \frac{1}{2} H,$$

так как B есть число магнитных линий на единицу поперечной поверхности. На основании последнего равенства мы приходим к заключению,

что в неоднородном магнитном поле, которое характеризуется непостоянством H, тяжение каждой отдельной магнитной линии меняется вдоль ее длины.

Выделим в неоднородном поле участок единичной трубки магнитной индукции, ограниченный двумя нормальными сечениями s_1 и s_2 (рис. 18). В данном случае имеют место следующие соотношения:

$$s_2 > s_1,$$

$$H_2 < H_1.$$

Отсюда получаем

$$f_{m1} > f_{m2}.$$

Таким образом, рассматривая данный участок трубки магнитной индукции в отношении механического равновесия, мы должны предположить наличие каких-то дополнительных сил. По Максвеллу, на силы продольного тяжения накладываются силы, по природе своей аналогичные гидростатическому давлению, т. е. нормальные к боковым стенкам трубки, что и показано соответствующими пунктирными стрелками на рис. 18. Очевидно, эти дополнительные силы, направленные наклонно к оси трубки, дадут составляющую в продольном направлении, которая добавляется к силе f_{m2}. В результате достигается механическое равновесие рассмотренного участка трубки магнитной индукции. То же самое необходимо сказать и в отношении любого участка каждой трубки магнитной индукции, входящей в состав магнитного потока. Каждая из них испытывает боковое давление со стороны окружающих ее трубок и в свою очередь оказывает на них такое же давление. В однородном магнитном поле этот боковой распор совершенно одинаков во всех направлениях. В неоднородном же поле боковой распор может быть неодинаковым с разных сторон трубки и в связи с этим может поддерживаться равновесие в системе искривленных магнитных линий.

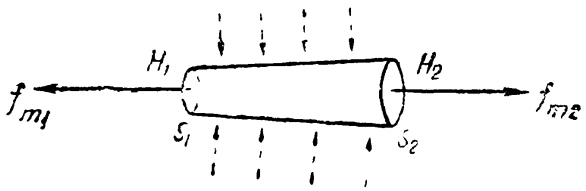


Рис. 18.

В общем случае выражение для сил бокового распора имеет сложный вид. В случае, когда отсутствует обычное вещество, т. е. в „пустоте“ (эфире), согласно Максвеллу, для силы бокового распора, отнесенной к единице поверхности, получается весьма простое выражение, а именно:

$$f'' = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}.$$

Сопоставляя это выражение с определенной выше величиной f' — силы продольного тяжения магнитных линий, отнесенной к единице поверхности поперечного сечения магнитного потока, приходим к заключению, что для „пустоты“ (эфира) имеет место следующее соотношение:

$$f'' = f'.$$

Это же соотношение весьма близко к истине и для случая воздуха, магнитная проницаемость которого мало отличается от μ_0.

Во всех остальных случаях

$$f'' \neq f'.$$

§ 24. Переход магнитного потока из одной среды в другую

а. Остановимся теперь на условиях перехода магнитного потока из одной среды, имеющей некоторую магнитную проницаемость μ_1, в другую среду с магнитной проницаемостью μ_2.

Когда магнитный поток нормален к поверхности раздела, мы не встречаем никаких осложняющих обстоятельств. В этом случае магнитный поток, переходя из одной среды в другую, не претерпевает каких бы то ни было изменений в отношении своего направления. Но если магнитный поток встречает поверхность раздела двух сред под некоторым углом, то происходит изменение направления магнитных линий, и это явление, по аналогии с преломлением световых лучей, обычно называют преломлением магнитных линий.

Представим себе (рис. 19) две однородные и изотропные среды *I* и *II*, обладающие магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 и разделенные плоской поверхностью *PQ*, перпендикулярной плоскости рисунка. Рассмотрим некоторую магнитную линию, направляющуюся, например, из среды *I* в среду *II*, и образующую угол θ_1 с нормалью *nn* к поверхности раздела *PQ*. Угол θ_1 будем называть углом падения. Пусть в среде *II* эта магнитная линия составляет с нормалью угол θ_2, о величине которого мы пока ничего не знаем. Угол θ_2 будем называть углом преломления. Условимся, кроме того, что поле и в первой и во второй среде однородно.

Нас интересует соотношение, характеризующее зависимость углов падения и преломления (θ_1 и θ_2) от магнитных свойств обеих сред. В случае, если магнитные проницаемости среды *I* и среды *II* одинаковы, никакого преломления не должно быть, так как в этом случае по отношению к магнитному потоку мы имеем как бы одну и ту же среду. Преломление магнитных линий является результатом именно различия магнитных проницаемостей μ_1 и μ_2.

Чтобы уяснить себе происходящее явление, необходимо рассмотреть магнитные условия на поверхности раздела. Составим линейный интеграл вектора *H* по контуру *abcda*, стороны которого *ab* и *cd* лежат в разных средах бесконечно близко к поверхности раздела. Пренебрегая бесконечно малыми отрезками *ad* и *bc*, можем написать

$$\oint H \cos\alpha \, dl = H_1 \sin\theta_1 \, ab - H_2 \sin\theta_2 \, bc = 0.$$

В данном случае линейный интеграл магнитной силы вдоль контура *abcda* равен нулю, так как сквозь этот контур не проходит электрический ток. Принимая во внимание, что $ab = cd$, получаем

$$H_1 \sin\theta_1 = H_2 \sin\theta_2,$$

т. е. у поверхности раздела тангенциальные составляющие магнитной силы в обеих средах тождественны.

Найдем теперь соотношение, характеризующее магнитную индукцию B_1 и B_2 у границы раздела, для чего воспользуемся принципом непрерывности магнитного потока. Рассмотрим магнитный поток сквозь замкнутую поверхность цилиндра, проекции оснований которого изображаются на рис. 19 линиями *ab* и *cd*. Обозначим площади этих оснований, бесконечно близких, но расположенных в разных средах, соответственно

через s_1 и s_2. Пренебрегая магнитным потоком сквозь бесконечно малую боковую цилиндрическую поверхность, имеем

$$\oint_s B\cos\alpha\, ds = -B_1\cos\theta_1 s_1 + B_2\cos\theta_2 s_2 = 0.$$

Принимая во внимание, что $s_1 = s_2$, можем написать

$$B_1\cos\theta_1 = B_2\cos\theta_2,$$

т. е. у поверхности раздела нормальные составляющие магнитной индукции в среде *I* и в среде *II* равны одна другой.

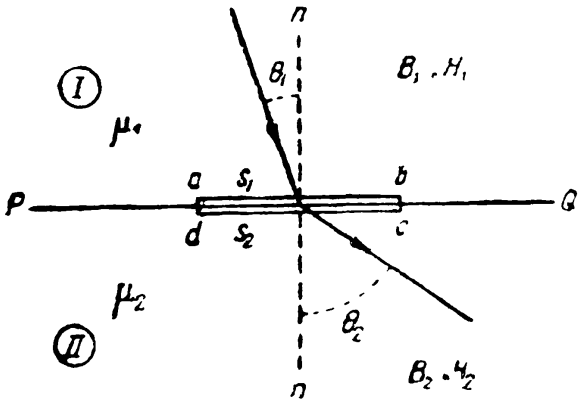


Рис. 19.

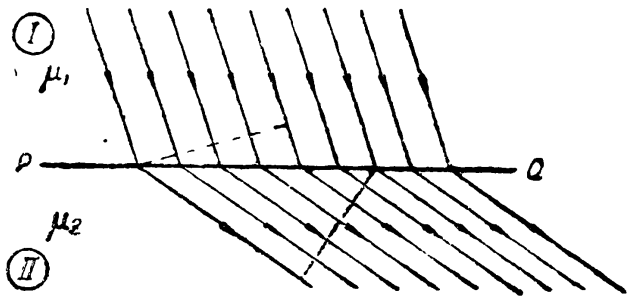


Рис. 20.

На основании двух соотношений, связывающих H_1 с H_2, с одной стороны, и B_1 с B_2 у поверхности раздела, с другой стороны, имеем

$$\frac{B_1}{H_1}\cdot\frac{1}{\operatorname{tg}\theta_1} = \frac{B_2}{H_2}\cdot\frac{1}{\operatorname{tg}\theta_2},$$

откуда окончательно получаем

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

Итак, *при переходе магнитного потока из одной среды в другую отношение тангенсов углов падения и преломления равно отношению соответствующих магнитных проницаемостей.*

Если $\mu_2 > \mu_1$, то и $\operatorname{tg}\theta_2 > \operatorname{tg}\theta_1$, откуда следует, что магнитные линии во второй среде будут в этом случае больше отклонены от нормали к поверхности раздела (рис. 20), т. е. будут сближаться и сгущаться. Число магнитных линий, приходящихся на единицу поверхности, нормальной к потоку (см. пунктирные линии на рис. 20), будет в среде *II* больше, чем в среде *I*, т. е.

$$B_2 > B_1.$$

Когда магнитный поток направлен нормально к поверхности раздела, то угол θ_1 равен нулю. Так как отношение магнитных проницаемостей μ_1 и μ_2 всегда имеет конечное значение, угол θ_2 также равен нулю. Следовательно, в данном случае густота магнитных линий в обеих средах будет одинаковая (рис. 21), и потому

$$B_2 = B_1.$$

В качестве замечания, имеющего практическое значение при построении общей картины распределения магнитного потока в электромагнитных механизмах, содержащих железо, отметим следующее. Так как магнитная проницаемость железа (обозначим ее через μ_2) в очень большое число раз превосходит магнитную проницаемость воздуха (μ_1), то, исходя из соотношения

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2}=\frac{\mu_1}{\mu_2},$$

видим, что даже в случае значительной величины угла θ_2, близкой к 90°, угол θ_1 будет сравнительно весьма мал, т. е. у поверхности железа магнитные линии в воздухе обычно составляют с нормалью к этой поверхности угол, практически близкий к нулю. Так, например, если $\theta_2=89°$ и $\mu_2=1000\mu_1$, то θ_1 равно приблизительно 3°20′.

б. Мы уже неоднократно имели повод указывать на чистую условность представления о магнитной массе. В связи с общим рассмотрением

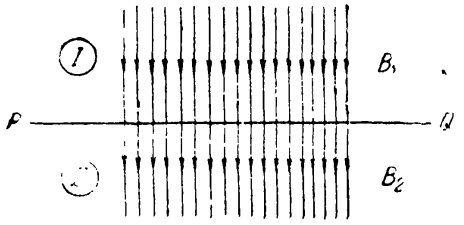


Рис. 21.

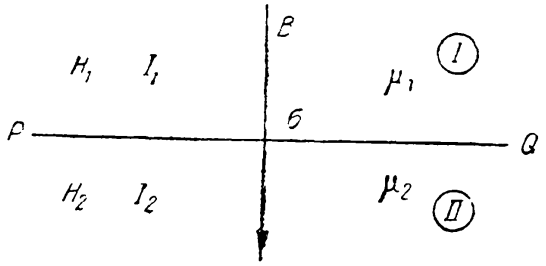


Рис. 22.

условий, соблюдаемых у поверхности раздела двух сред при прохождении магнитного потока сквозь данную поверхность, целесообразно еще раз остановиться на вопросе о фиктивности магнитных масс и тем самым покончить с этим вопросом.

В обычной математической теории магнитного поля местам перехода магнитного потока через поверхность, которая разграничивает одну среду от другой, приписываются некоторые „магнитные массы“ или „количества магнитизма“. С фарадеевской же точки зрения, „магнитная масса“, не будучи какой-то самостоятельной физической реальностью, является функцией магнитных свойств тел, лежащих на пути магнитного потока, и представляет собой лишь математическую абстракцию, объективируемую без достаточных к тому оснований. Действительно, легко показать, что поверхностная плотность „магнитных масс“ (обозначим ее буквой σ) связана весьма простым соотношением с плотностью магнитного потока, т. е. с величиной магнитной индукции B, и с магнитной проницаемостью одной и другой среды, т. е. с μ_1 и μ_2.

Прежде всего напомним, что интенсивность намагничения I есть магнитный момент единицы объема (§ 12). Следовательно, поверхностная плотность магнитной массы σ, приписываемая поверхности некоторого тела в случае, когда перпендикулярный к этой поверхности магнитный поток выходит из объема тела в окружающее его „пустое“ пространство, численно равна интенсивности намагничения I, которою обладает данное тело в связи с прохождением магнитного потока через него, т. е.

$$\sigma=I.$$

Если бы данное тело было окружено не „пустотой", а тем же веществом, из которого состоит это тело, то для его поверхности мы имели бы:

$$\sigma = 0.$$

Рассмотрим подробнее случай, когда магнитный поток проходит в направлении нормали к поверхности раздела PQ (рис. 22) из среды I с магнитной проницаемостью μ_1 в среду II с магнитной проницаемостью μ_2. Магнитная индукция B в этом случае является общей для обеих сред I и II, а магнитная сила и интенсивность намагничения в этих средах, вообще говоря, различны. Обозначим их через H_1, I_1 и H_2, I_2. Плотность магнитной массы σ на поверхности раздела PQ будет определяться по величине и по знаку следующим соотношением:

$$\sigma = I_1 - I_2.$$

Принимая во внимание, что и в среде I и в среде II магнитная индукция имеет одно и то же значение, можно написать (см. § 12)

$$B = \mu_0 H_1 + I_1 = \mu_0 H_2 + I_2,$$

откуда получаем

$$I_1 = B - \mu_0 H_1,$$

$$I_2 = B - \mu_0 H_2.$$

На основании этого имеем

$$\sigma = \mu_0 (H_2 - H_1).$$

Так как далее

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1},$$

$$H_2 = \frac{B}{\mu_2},$$

то получаем окончательно:

$$\sigma = \frac{\mu_0 (\mu_1 - \mu_2)}{\mu_1 \mu_2} B.$$

Итак, мы видим, что *поверхностная плотность распределения магнитных масс, которые нам кажутся существующими на поверхности, разграничивающей две среды, и по знаку и в количественном отношении определяется характером изменений магнитной проницаемости при переходе магнитного потока из одной среды в другую.*

На основании полученного выражения для σ мы приходим к заключению, что если

$$\mu_1 > \mu_2,$$

то

$$\sigma > 0,$$

т. е. при переходе магнитного потока из среды с большей магнитной проницаемостью в среду с меньшей магнитной проницаемостью, например при переходе из железа в воздух, мы приписываем поверхности раздела положительные (северные) магнитные массы.

Если же магнитный поток направляется из среды с меньшей магнитной проницаемостью в среду с большей магнитной проницаемостью (в нашем примере — из воздуха в железо), то будет

$$\mu_1 < \mu_2$$

и соответственно

$$\sigma < 0,$$

т. е. на поверхности раздела оказываются отрицательные (южные) магнитные массы.

Если оставить неизменными направление магнитного потока и магнитную проницаемость одной среды, скажем, если сохранять

$$\mu_1 = \text{Const.},$$

а μ_2 подбирать так, чтобы оно было то меньше μ_1, то больше μ_1, то знак магнитной массы на той же поверхности раздела мы можем менять по своему желанию, можем по произволу делать магнитную массу то положительной (северной), то отрицательной (южной).

Полученное выше соотношение, определяющее величину поверхностной плотности магнитных масс σ, имеет сравнительно простой вид в рассмотренном частном случае, когда направление магнитного потока нормально к поверхности раздела PQ. В случае же какого угодно направления магнитного потока относительно поверхности раздела PQ указанное соотношение несколько осложняется, но общий характер зависимости σ от μ_1 и μ_2 остается по существу одним и тем же.

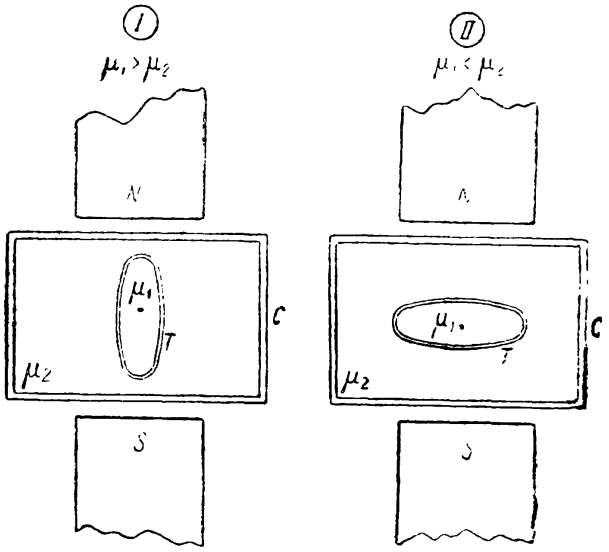


Рис. 23.

Для экспериментальной проверки своих логических выводов Фарадей произвел следующие опыты.[1] Он приготовил несколько водных растворов парамагнитной соли железа различной концентрации и наполнил этими растворами стеклянные запаянные трубочки. Подвешивая эти трубочки горизонтально при помощи тонкой нити, прикрепленной к середине каждой трубочки, и помещая их между полюсами магнита в воздухе, Фарадей наблюдал, как и следовало ожидать, аксиальное расположение трубочек (рис. 23, *I*), т. е. они все вели себя подобно железным стерженькам, располагающимся вдоль магнитного поля. Когда же Фарадей в сосуд C, расположенный между полюсами N и S так, чтобы он окружал трубочку T, наливал раствор соли железа высшей концентрации, чем раствор в трубочке, то последняя поворачивалась и занимала экваториальное положение, перпендикулярное магнитному полю (рис. 23, *II*), т. е. в этом случае трубочка вела себя как стержень из висмута при подвешивании его в воздухе между полюсами магнита. (Как известно, магнитная проницаемость висмута несколько меньше магнитной проницаемости воздуха.) Если же в сосуд C наливался раствор меньшей

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, 3312—3317.

концентрации, чем в испытуемой трубочке, то расположение неизменно получалось аксиальное (рис. 23, *I*).

Подвесив какую-либо трубочку с раствором соли железа промежуточной концентрации, Фарадей мог, изменяя соответствующим образом концентрацию раствора, наливаемого в сосуд *C*, заставить ту же самую трубочку принимать то аксиальное, то экваториальное расположение (рис. 23, *I* и *II*).

Расположение аксиальное получалось при условии $\mu_1 > \mu_2$, т. е. тогда, когда всё происходило так, как будто бы на частях поверхности трубочки, обращенных к полюсам магнита, появляются магнитные массы противоположной полярности: концы трубочки „притягиваются" к полюсам *N* и *S*. В случаях же экваториального расположения, т. е. когда $\mu_1 < \mu_2$, всё происходило так, как будто бы на частях поверхности трубочки, обращенных к полюсам магнита, появляются магнитные массы той же полярности, что и на полюсах: концы трубочки „отталкиваются" от полюсов *N* и *S*.

Фарадей всячески разнообразил опыты этого рода, применяя, между прочим, не один сосуд *C*, а несколько подобных сосудов, располагаемых один в другом и заполняемых растворами соли железа различных концентраций. Это необходимо было ему для проверки некоторых добавочных соображений, касающихся роли промежуточной среды.

Описанные опыты Фарадея чрезвычайно ценны по своим результатам, которые самым убедительным образом доказывают следующее:

1. „Магнитные массы" не обладают бесспорными признаками определенных физических реальностей. Как оказывается, не только в количественном отношении, но даже в отношении своего знака эти „магнитные массы" полностью зависят от свойств окружающей среды и могут по воле экспериментатора превращаться из положительных (северных) в отрицательные (южные) или обратно.

2. Таким образом, гипотеза о существовании „магнитных масс„ опровергается непосредственным опытом.

3. Оперируя с „магнитными массами" при математическом рассмотрении процессов, совершающихся в магнитном поле, мы всегда должны принимать во внимание чистую условность представления о подобного рода „массах".

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

§ 25. Основные установки Фарадея

а. Во всех без исключения электромагнитных устройствах (динамомашинах, электродвигателях, трансформаторах и т. п.), когда мы имеем дело с преобразованием энергии, а также вообще всегда, когда физическое явление связано с каким бы то ни было перераспределением или изменением запаса энергии магнитного поля, — во всех случаях мы обязательно встречаемся с соответствующими изменениями конфигурации магнитного потока в целом или в отдельных его частях. В справедливости этого утверждения мы с несомненностью убеждаемся при внимательном обследовании электромагнитных процессов. Всякое изменение конфигурации магнитного потока мы будем называть *преобразованием магнитного потока.*

б. Из всего комплекса фарадеевских представлений о магнитном поле наибольшее значение для наших ближайших рассуждений имеют следующие два положения, сформулированные нами в строгом соответствии с подлинными высказываниями Фарадея.

Положение первое. *Магнитный поток состоит из реально существующих нитеобразных элементов, которые сам Фарадей называл „физическими силовыми линиями“.* (Мы теперь называем их магнитными линиями.)

Положение второе. *Каждая магнитная линия принципиально непрерывна, т. е. всегда образует замкнутый контур, который может претерпевать какие угодно изменения в отношении своей формы, но только не разрыв.*

Мы уже неоднократно касались содержания обоих этих положений. По их поводу укажем еще следующее. Если исходить из безоговорочного признания справедливости данных положений, то из них естественно *вытекает ряд следствий, совершенно обязательных при рассмотрении общих условий всякого преобразования магнитного потока.* Отвергая эти следствия, мы тем самым отвергаем и исходные положения.

Признавая справедливость приведенных основных положений, мы должны, таким образом, в полном согласии с идеями Фарадея и Максвелла, неуклонно считаться с тем обстоятельством, что каждая магнитная линия не есть лишь некоторое проявление свойств магнитного поля, но представляет собой совершенно определенную физическую реальность, которая сама является носительницей этих свойств. На основании этого можем утверждать, что магнитная линия никоим образом не может, оставаясь на месте, превратиться в ничто и исчезнуть. Она может перестать существовать в данном месте только в процессе перемещения

ее в другое место.[1] Она может при этом претерпевать такие преобразования, которые выводят ее из поля нашего внимания. Вообще, в качестве особого рода физической реальности магнитный поток до некоторой степени аналогичен количеству электричества, а элементарная магнитная линия аналогична элементарному электрическому заряду, т. е. заряду электрона.

При преобразованиях магнитного потока во многих случаях мы имеем дело с процессом такого *непрерывного* преобразования отдельных магнитных линий, во время которого путем слияния некоторых частей этих линий может происходить либо деление одной замкнутой магнитной линии на две обособленные замкнутые же магнитные линии, либо, обратно, сращивание двух обособленных магнитных линий в один общий замкнутый контур. Подобного рода преобразования магнитных линий были рассмотрены в свое время Фарадеем, и он касается их в III томе своих „Опытных исследований по электричеству". В следующих параграфах, данных здесь в переводе и с сохранением нумерации Фарадея, весьма определенно выражено его мнение по этому поводу, явившееся результатом длительного и тщательного изучения свойств магнитного поля:

„3226. Силовые линии различных магнитов, находящихся в благоприятном расположении друг относительно друга, сращиваются.

3227. При этом сращивании не происходит никакого увеличения полной силы линий; пересечение [этих линий проводником] в промежутке между двумя сближенными полюсами обнаруживает ту же самую результирующую активность, как и пересечение линий неизменившегося магнита, когда мы имеем дело лишь с ним одним (3217)...

3230. Линия магнитной силы, рассматриваемая как замкнутый контур (3117), проходит на своем протяжении через *оба* магнита, которые на время помещены так, чтобы действовали друг на друга благоприятно, т. е. линии которых делаются общими и сращиваются. Сращивание не есть добавление одной силовой линии к другой *в отношении активности*, но является их объединением в общий контур.

3294. Сближение магнита с магнитом и всё, что возникает при этом (3218), происходит в полном соответствии, насколько я мог обнаружить, с идеей о физической линии магнитной силы..."[2]

Отметим, что параграфы 3226 и 3230 приведены полностью. Выделение основных положений в столь небольшие по объему параграфы

---

[1] См. цитату из Максвелла в § 18 Главы III этой книги.

[2] 3226. Lines of force of different magnets in favourable positions to each other coalesce.

3227. There is no increase of the total force of the lines by this coalescence; the section between the two associated poles gives the same sum of power as that of the section of the lines of the invariable magnet when it is alone (3217)...

3230. A line of magnetic force being considered as a closed circuit (3117), passes in its course through *both* the magnets, which are for the time placed so as to act on each other favourably, i. e. whose lines coincide and coalesce. Coalescence is not the addition of one line of force to another in *power*, but their union in common circuit.

3294. The association of magnet with magnet, and all the effects then produced (3218), are in harmony, as far as I can perceive, with the idea of a physical line of magnetic force...

Перевод был сделан возможно ближе к подлиннику с соблюдением его точного смысла и с полным сохранением терминологии Фарадея. В квадратные скобки в п. 3227 заключены пояснительные слова, необходимые для полного понимания того, о чем именно здесь идет речь.

(п. 3226 содержит в оригинале всего полторы строки) свидетельствует о том особом значении, которое им придавал сам Фарадей. Параграфы 3226, 3227 и 3230 взяты из мемуара, озаглавленного „On the amount and general disposition of forces of a magnet when associated with other magnets“ (серия XXIX). Параграф 3294 входит в состав мемуара, носящего название „On the physical character of the lines of magnetic force“.

Содержание приведенных параграфов из фарадеевских „Опытных исследований по электричеству“ по существу непосредственно следует из основных двух положений, сформулированных выше. Это следствие выведено самим Фарадеем. Оно касается одного из самых существенных моментов в процессе преобразования магнитных линий. Поэтому Фарадея и необходимо считать основоположником того раздела учения о физических свойствах магнитного потока, который посвящен его преобразованиям.

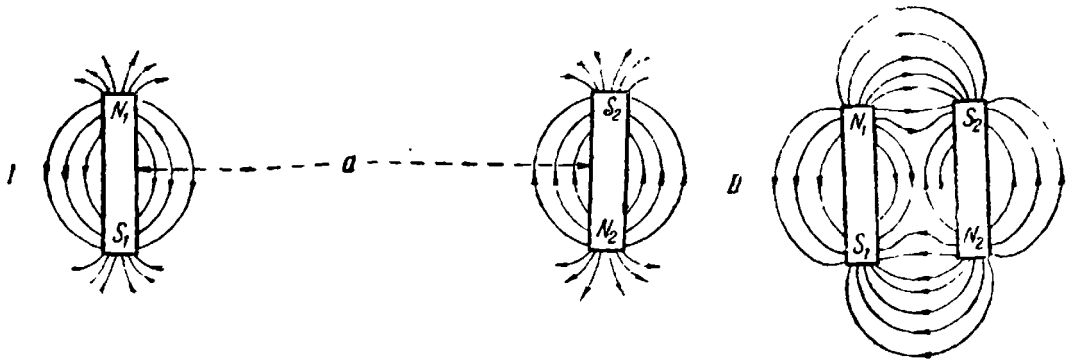


Рис. 24.

в. В качестве пояснения и для иллюстрации того случая преобразований магнитного потока, который рассмотрен Фарадеем, обратимся к рис. 24. Здесь изображены два магнита N_1S_1 и N_2S_2 на различных расстояниях друг от друга. Полюсы обоих магнитов обращены в разные стороны. Так, в первом магните северный полюс N_1 изображен наверху, а южный полюс S_1 — внизу. Во втором же магните принято обратное расположение: северный полюс N_2 изображен внизу, а южный полюс S_2 — наверху. Такое взаимное расположение магнитов Фарадей и характеризовал словами „благоприятное расположение“. В случае *I* расстояние *a* между магнитами показано сравнительно большим. Оно может быть сколь угодно велико. При этом магнитный поток одного магнита представляет собой совершенно самостоятельную систему магнитных линий, полностью обособленную от магнитного потока другого магнита. Но подобная обособленность нарушается по мере сближения магнитов. В случае *II* расстояние между магнитами показано на рис. 24 сравнительно небольшим, и здесь же схематически изображено распределение магнитных линий, связанных с двумя магнитами N_1S_1 и N_2S_2, которые в данном случае сближены, находясь в „благоприятном“ расположении. Значительная часть магнитных линий оказывается теперь общей для обоих магнитов. Каждая из этих магнитных линий образует один замкнутый контур, проходящий через оба магнита по пути $N_1S_2N_2S_1N_1$. Некоторая же часть магнитных линий первого и второго магнита, вообще говоря, сохраняет еще свою обособленность, не претерпев никакого сращивания с другими магнитными линиями. При предельном сближении магнитов N_1S_1 и N_2S_2 до полного их соприкосновения практически

почти все магнитные линии сольются воедино и образуют общий для обоих магнитов поток.

Фарадей в вышеприведенных параграфах говорит только о процессе сближения магнитов и о том, что при данном процессе происходит. Но совершенно ясно, что удаление магнитов друг от друга должно сопровождаться обратным преобразованием магнитного потока. По мере перехода от расположения *II* к расположению *I* (рис. 24) те магнитные линии, которые являются общими для обоих магнитов, должны последовательно претерпевать разделение их на два самостоятельных контура. В конце концов, при значительном раздвижении магнитов, вновь образуются два совершенно обособленных магнитных потока, каждый из которых оказывается теперь связанным только с одним магнитом. Описываемые процессы сближения и обратного раздвигания магнитов можно повторять попеременно сколько угодно раз. Будут повторяться при этом и соответствующие преобразования магнитного потока.

Всегда при сближении двух магнитов, надлежащим образом ориентированных, будет происходить сращивание (слияние) магнитных линий, а при раздвигании этих магнитов — разделение каждой общей магнитной линии на два самостоятельных контура.

г. Рассмотренные основные случаи преобразований магнитного потока — сращивание и разделение магнитных линий — имеют большое принципиальное значение как с теоретической точки зрения, так и в практическом отношении. Изучение их, с одной стороны, позволяет углубиться в сущность магнитных явлений и, с другой стороны, способствует более отчетливому пониманию процессов, происходящих в электромагнитных механизмах. К сожалению, в связи с недостаточно прочно установившимися взглядами на магнитный поток как на подлинную физическую реальность, вопрос о его преобразованиях до последнего времени оставался совершенно вне поля внимания физики и теоретической электротехники.

До какой степени современному физику, вообще говоря, могут быть чужды представления, с которыми мы оперировали в настоящем параграфе, явствует, например, из переписки автора с одним очень авторитетным профессором физики (ныне покойным) именно по поводу преобразований магнитного потока. Вот что, между прочим, высказал этот ученый в своем письме от 22 июня 1927 г.: „Несколько непривычны мне эти рассуждения, при которых линиям сил придается или приписывается реальное существование как носителям энергии. Но мне ясно, что для практика-электротехника это самая удобная модель. Не следует только увлекаться, придавая и выводам реальное, физическое значение, полагая, что они вскрывают фактический механизм происходящего процесса".

По поводу этих слов можно отметить, во-первых, что электротехника есть отрасль прикладной физики, не имеющая права оперировать с физическими представлениями, которые являются неприемлемыми для ученых, работающих в области чистой физики. Во-вторых, физические представления, оказывающиеся полезными и ценными в области электротехники, не могут не иметь того же значения и в области теоретической физики, так как теория и практика по существу неразрывны и связаны внутренним единством. Наконец, в-третьих, был такой глубокий теоретик-физик (имя его — Максвелл), для которого идеи Фарадея не только не казались мало приемлемыми, но который полностью проникся ими, нашел их весьма плодотворными и дал им чрезвычайно широкое развитие, приведшее к важным практическим результатам. И именно Максвелл разделял

мнение Фарадея о „физических силовых линиях" магнитного поля и об их свойствах. К этому можно еще добавить следующее. Все цитированные выше параграфы из „Опытных исследований по электричеству" принадлежат к той группе мемуаров Фарадея, о которой Сильванус Томпсон говорил, что ее каждому, работающему в области физики, необходимо „читать, перечитывать и снова читать".[1]

§ 26. Примеры сращивания, разделения и деформирования магнитных линий

а. В предыдущем параграфе, на рис. 24, изображена схема преобразований магнитного потока для основного случая, рассмотренного самим Фарадеем. Остановимся еще раз на этом случае, изменив несколько обстановку эксперимента. Представим себе четыре длинных стержневых магнита *1*, *2*, *3*, и *4* (рис. 25), концы которых с одной стороны тесно сближены. Другие же четыре конца N_1, S_2, N_3, S_4 раздвинуты и чере-

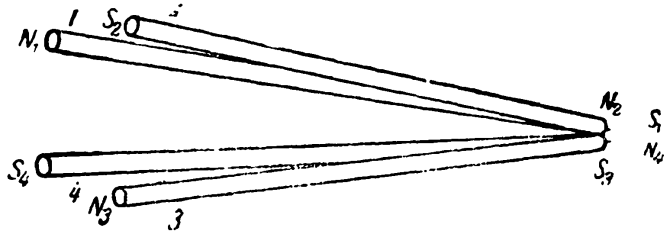


Рис. 25.

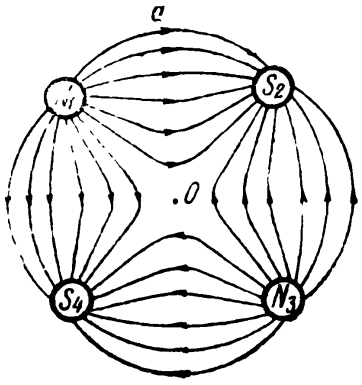


Рис. 26.

дуются в том порядке, как это показано на рисунке. В плоскости, в которой расположены раздвинутые полюсы, получается распределение магнитных линий, схематически изображенное на рис. 26. В данном случае, при симметричном расположении полюсов вокруг некоторой центральной точки *O*, магнитные линии, исходящие из полюса N_1, разделяются поровну и направляются в полюсы S_2 и S_4 двумя одинаковыми пучками. Точно так же ведут себя и магнитные линии, исходящие из полюса N_3 и направляющиеся к тем же полюсам S_2 и S_4. Вся картина магнитного поля симметрична вокруг точки *O*.

Проследим контур некоторой магнитной линии, например магнитной линии *a*. От полюса N_1 она идет к полюсу S_2, входит в него, далее идет внутри тела магнита *2* от полюса S_2 к полюсу N_2, выходит из этого последнего и немедленно входит в один из двух близко расположенных южных полюсов: либо в S_1, либо в S_3. В первом случае дальнейший путь магнитной линии лежит внутри тела магнита *1* от полюса S_1 к N_1, так что она образует замкнутый контур, проходящий только сквозь два магнита *2* и *1*. Во втором случае рассматриваемая магнитная линия будет продолжать свой путь следующим образом: от S_3 до N_3 сквозь магнит *3*, затем по воздуху от N_3 до S_4, от S_4 до N_4 сквозь магнит *4*, из N_4 в S_1, от S_1 к N_1 сквозь магнит *1*, образуя замкнутый контур, про-

[1] Silvanus P. Thompson. Michael Faraday. His Life and Work. 1898, p. 211.

ходящий сквозь все четыре магнита *2*, *3*, *4* и *1*. Проходит ли контур магнитной линии *a* сквозь два или сквозь четыре магнита, это зависит от условий сближения полюсов S_1, N_2, S_3 и N_4. Сказанное о контуре магнитной линии *a* полностью относится ко всякой другой магнитной линии, связанной с системой магнитов *1*, *2*, *3* и *4*.

Возвратимся теперь к рассмотрению картины поля, изображенной на рис. 26. Всякое изменение в относительном расположении полюсов N_1 S_2, N_3 и S_4 будет сопровождаться соответствующими преобразованиями отдельных контуров магнитных линий, изменится и общая картина поля. Попарное сближение полюсов N_1 S_2 и N_3 S_4 приводит к распределению магнитных линий, представленному на рис. 27, где большая часть магнитных линий, исходящих из полюса N_1, направляется к S_2 и большая часть магнитных линий, исходящих из полюса N_3, направляется к S_4. Это расположение соответствует тому, что было изображено на рис. 24, *II*, который иллюстрирует случай преобразования магнитного потока, рассмотренный Фарадеем. Если, исходя из распо-

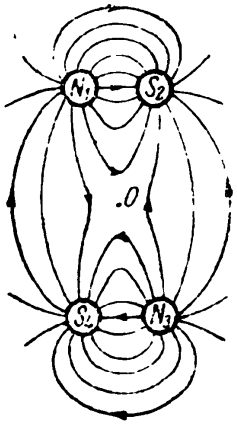


Рис. 27.

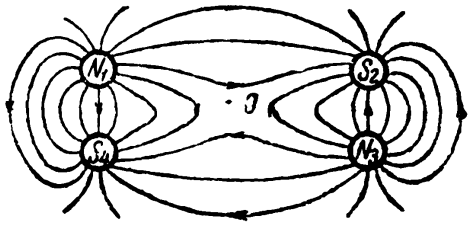


Рис. 28.

ложения полюсов, представленного на рис. 26, сблизить полюсы N_1 с S_4 и S_2 с N_3, то теперь большая часть магнитных линий, исходящих из полюса N_1, будет направлена к S_4, а из N_3 — к S_2 (рис. 28). При переходе от расположения, изображенного на рис. 27, к расположению, изображенному на рис. 28, и обратно, магнитные линии будут претерпевать те или иные сращивания (слияния) и разделения, но при этом контур каждой магнитной линии остается неизменно замкнутым. Как может соблюдаться такое условие, об этом мы будем говорить особо в §§ 27—31. Теперь же ограничимся указанием на то обстоятельство, что процесс сращивания и разделения контуров отдельных магнитных линий несомненно происходит в том месте поля, где оказываются сближенными участки магнитных линий, противоположно направленных (область около точки *O*, рис. 26—28). Одновременно с процессом сращивания и разделения происходят соответствующие перемещения, а также деформирования магнитных линий.

Картины магнитного поля, представленные на рис. 26—28, изображены, конечно, в весьма схематическом виде, дающем лишь общий характер того или иного результирующего поля. Можно, однако, чисто математическим путем, между прочим пользуясь методом зеркальных изображений или применяя функции комплексного переменного, дать точный расчет магнитного поля в целом ряде частных случаев и построить систему магнитных линий в данном поле. Те схематические картины распределения магнитных линий, которые мы приводили на предыдущих

рисунках и будем приводить на всех последующих, в огромном большинстве случаев интересных в практическом отношении, легко получаются чисто опытным путем при помощи железных опилков, посыпаемых на лист картона, надлежащим образом расположенный. Этим именно методом железных опилков пользовался Фарадей в своих многочисленных экспериментах, в которых он обследовал характер расположения магнитных линий („физических силовых линий" магнитного поля) и которые привели его к весьма важным выводам, легшим в основу учения о магнитном потоке.[1]

6. В той совокупности четырех магнитов *1*, *2*, *3* и *4*, которая представлена на рис. 25, можно несколько иначе чередовать полюсы N_1, S_2, N_3 и S_4. Допустим, что начальное расположение полюсов принято такое, как изображено на рис. 29. Затем полюсы N_1 и S_2 сблизим, а полюсы N_3 и S_4 удалим один от другого. Произойдет преобразование системы магнитных линий, связанных с четырьмя полюсами, причем процесс сращивания и разделения будет иметь место в областях около точек O_1 и

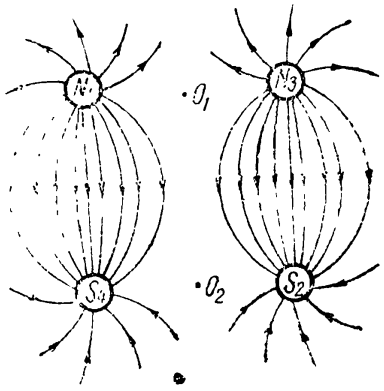


Рис. 29.

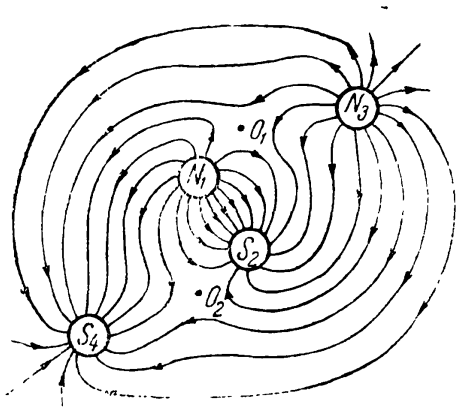


Рис. 30.

O_2, где может осуществляться необходимое сближение участков противоположно направленных магнитных линий. В результате получится распределение магнитных линий, подобное изображенному на рис. 30. Если же полюсы N_1 и S_2 удалить один от другого, а полюсы N_3 и S_4 сблизить, то преобразование магнитных линий приведет к картине, представленной на рис. 31. В обоих случаях ясно видно значительное искажение той сравнительно простой схемы распределения магнитных линий, из которой мы исходим (рис. 29). Получается перераспределение числа магнитных линий, связывавших раньше разноименные полюсы. Сверх того наблюдается сильное деформирование и сложное искривление отдельных магнитных линий.

Рис. 30 и 31 интересны в том отношении, что они иллюстрируют случай одновременного существования двух поперечных полей. Это весьма часто встречается на практике в различных электромагнитных механизмах и приборах. Подобные два взаимно поперечных магнитных поля, для которых можно было бы построить две самостоятельные системы магнитных линий, сливаются в одно общее поле, характеризуемое результирующим распределением магнитных линий (рис. 30 и 31) после их преобразования. Рассматривая в данном случае удаленные полюсы как источник одного поля, а сближенные полюсы — в качестве источника поперечного поля, мы получаем из картины распределения

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III, 3234—3242. См. также Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 541.

магнитных линий простое объяснение наблюдаемого в этих условиях вращающего момента, стремящегося повернуть одну относительно другой соответствующие части того или иного механизма (часть с полюсами N_1 и S_2 и часть с полюсами N_3 и S_4). Здесь необходимо, конечно, принять во внимание, что магнитные линии ведут себя подобно некоторым упругим нитям, испытывающим продольное тяжение (см. § 23 главы III). При повороте указанных частей электромагнитного устройства под действием сил тяжения магнитных линий будут иметь место дальнейшие преобразования магнитного потока. При этом опять-таки отметим, что процесс сращивания и разделения происходит в областях около особых точек O_1 и O_2, где сближаются противолежащие участки магнитных линий, направленных в разные стороны.

в. Всякий электрический ток связан, как известно, с системой магнитных линий, сцепляющихся с контуром тока. В простейшем случае прямолинейного тока магнитные линии его поля имеют форму кругов различных диаметров с центрами, лежащими на оси проводника (рис. 32). Если

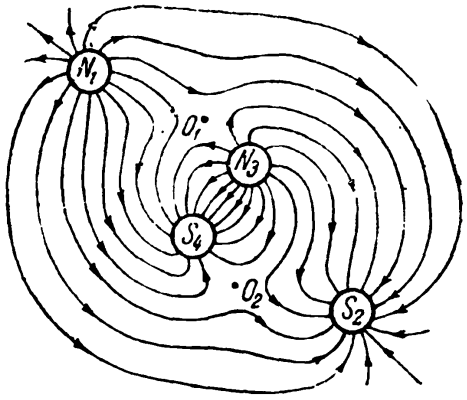


Рис. 31.

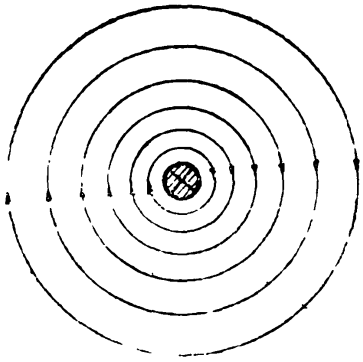


Рис. 32.

сблизить два прямолинейных параллельных проводника с токами разного направления, то в промежутке между ними магнитные линии, сцепляющиеся с каждым из рассматриваемых токов, оказываются одинаково направленными. При этом всё преобразование магнитного потока сводится к перемещению магнитных линий, сохраняющих круговую форму, в сторону от осей проводников (рис. 33; проводники, перпендикулярные плоскости чертежа, показаны в сечении). Как видим, магнитные линии между проводниками будут сгущены по сравнению с тем, что имеет место по сторонам. Принимая во внимание существование бокового распора между магнитными линиями, одинаково направленными, мы заключаем, что в промежутке между проводами стремление магнитных линий раздвинуться будет больше, чем снаружи. В то же время эти магнитные линии составляют, так сказать, одно целое с охватываемыми ими токами. Следовательно, два параллельных и противоположно направленных тока, а также и несущие их проводники будут отталкиваться один от другого. Если проводники имеют возможность двигаться, то они удалятся один от другого и, по мере их раздвижения, связанные с каждым из них магнитные линии будут постепенно перемещаться относительно соответствующих проводников, в пределе стремясь принять концентрическое расположение, показанное на рис. 32.

В случае, если по двум прямолинейным проводникам, параллельно расположенным, протекают токи одного и того же направления, то в результате преобразований магнитного потока получится распределение магнитных линий, схематически представленное на рис. 34. Здесь

мы будем иметь часть магнитных линий, которые после соответствующего слияния охватывают оба проводника. Другая же часть магнитных линий, ближайших к проводникам, остается сцепляющейся только с одним проводником. При дальнейшем сближении проводников с одинаково направленными токами некоторые из этих последних магнитных линий также претерпят сращивание и образуют контуры, охватывающие уже два проводника. При раздвижении же данных проводников с токами будет происходить обратный процесс. Магнитные линии, общие для обоих проводников, последовательно будут разделяться на обособленные звенья, каждое из которых сцепляется теперь лишь с одним проводником. Указанный процесс сращивания и разделения магнитных линий (соответственно — при сближении и при раздвигании проводников с одинаково направленными токами) будет происходить вблизи особой точки O (рис. 34), где расположены участки противоположно направленных магнитных линий. Наличие охватывающих оба проводника магнитных линий, которые обладают свойством продольного тяжения, будет иметь следствием стремление данных проводников сблизиться, т. е. они будут как бы притягиваться одни к другому. Это как раз и наблюдается в случае токов, одинаково направленных.

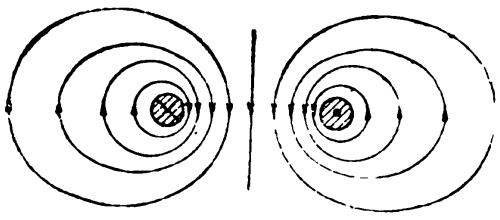


Рис. 33.

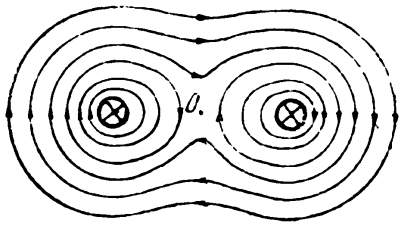


Рис. 34.

Всякое сгибание прямолинейного проводника, по которому течет ток, вызывает обусловленное этим преобразование магнитного потока, выражающееся в деформировании системы магнитных линий, окружающих место изгиба. Если проводник с током образует кольцо, то соответствующее этому круговому контуру тока расположение магнитных линий получится такое, как показано на рис. 35. И в данном случае, подобно тому как при двух параллельных проводниках с токами обратного направления, сгущение магнитных линий внутри кольца обусловит наличие сил, стремящихся раздвинуть противоположные участки кольца. Иными словами, кольцо, обтекаемое током, испытывает действие механических сил в направлении увеличения диаметра кольца. В электротехнике приходится встречаться с вредным действием такого рода сил, когда имеют дело с жидкими проводниками. В случае, например, индукционных печей с жолобом для жидкого металла, при достаточно сильных токах в этом жидком металле, иногда возникают столь значительные усилия, что дело доходит до разрыва жидкого кольцеобразного проводника и перерыва тока в нем (так называемый пинч-эффект). Вообще же говоря, здесь необходимо считаться и с наличием нормального давления на всю поверхность проводника с током со всех сторон, где стремящиеся сократиться магнитные линии непосредственно прилегают к этой поверхности. Однако указанное давление оказывается бо́льшим изнутри кольца, чем снаружи, так как внутри кольца магнитные линии сильнее сгущены по сравнению с внешним пространством.

Если расположить рядом, в параллельных плоскостях, два кольца с токами противоположных направлений, то получается картина распре-

деления магнитных линий, схематически изображенная на рис. 36. И в данном случае наблюдается лишь деформирование магнитных линий и их сгущение в областях пространства между противоположно направленными токами. В результате наблюдается „отталкивание" рассматриваемых кольцевых проводников с токами и стремление их удалиться друг от друга. Но в случае, когда сближены два проводника кольцевой формы, по которым протекают токи одного и того же направления (рис. 37), эти проводники „притягиваются" один к другому и стремятся еще более сблизиться, так как они стягиваются образовавшимися магнитными линиями, общими для обоих проводников. Соответствующее преобразование магнитного потока, в данном случае сращивание меньших магнитных звеньев, ранее входивших в состав потока самоиндукции каждого отдельного витка, произошло около особых точек O_1 и O_2, т. е. там, где сближаются разно направленные магнитные линии. Около этих же особых точек O_1 и O_2 будет происходить обратный процесс разделения общих магнитных линий на индивидуальные магнитные

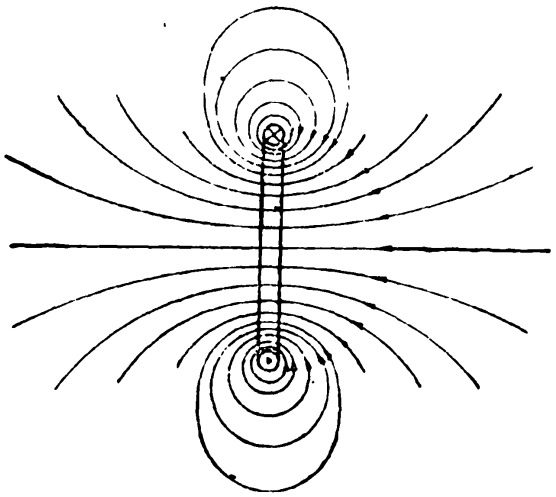


Рис. 35.

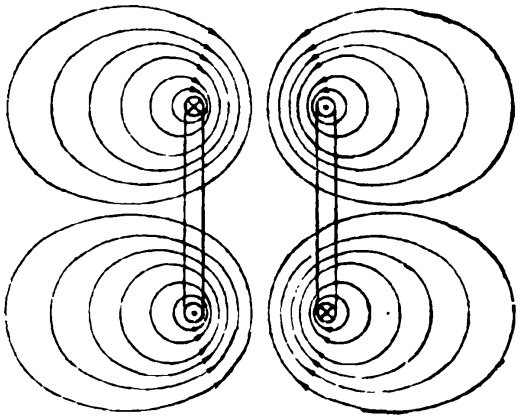


Рис. 36.

звенья, сцепляющиеся с контуром каждого тока в отдельности, в том случае, когда мы будем раздвигать два кольца, преодолевая внешней механической силой стремление их сблизиться.

Последний рассмотренный случай преобразования магнитного потока (рис. 37) представляет большой интерес в том отношении, что в электротехнической практике проводники, которым придана форма колец или витков, сближенных между собою и несущих ток одного и того же направления, имеют чрезвычайно широкое распространение. Нет почти ни одного электротехнического прибора, ни одного механизма или устройства, в которые не входили бы в качестве главных и весьма существенных частей катушки из большего или меньшего количества витков изолированного проводника (электромагнитные генераторы и двигатели, трансформаторы переменного тока, реле и всевозможная специальная электротехническая аппаратура, электроизмерительные приборы и т. д. и т. п.). Тот магнитный поток, который возникает при прохождении тока через обмотку каждой подобной катушки и который в основном является общим для всех витков катушки, создается не как иначе, а именно в результате преобразования системы индивидуальных магнитных звеньев, сцепляющихся с каждым отдельным витком и сращивающихся в магнитные линии, охватываемые рядом витков, подобно тому как это представлено на рис. 37 применительно к двум виткам. Дальнейшие преобразования магнитного потока происходят при всяком

функционировании электромагнитных механизмов и приборов, а также в случае какого бы то ни было изменения токов, протекающих через катушки.

г. Существует один случай преобразований магнитного потока, представляющий значительный интерес в теоретическом отношении. Речь идет о возникновении магнитных линий, имеющих форму спиралей. Такого рода спиралевидные магнитные линии получаются при наложении на поле прямого проводника с током второго магнитного поля, параллельного рассматриваемому проводнику. В результате слияния этих двух полей и образуются магнитные линии, обвивающиеся в виде спиралей вокруг прямого проводника. Магнитное поле, параллельное прямому проводнику, проще всего образовать, пропуская другой ток через обмотку некоторой катушки, с осью которой совпадает прямой проводник. Обозначим через i_1 ток в прямом проводнике и через i_2 — ток в обмотке катушки. Само собой разумеется, что шаг спиральной магнитной линии, при прочих равных условиях, будет зависеть от величины отношения $\frac{i_1}{i_2}$. При том же отношении токов i_1 и i_2 шаг спиральной магнитной линии будет тем больше, чем больше диаметр витков спирали, так как продольное магнитное поле, связанное с током i_2 и параллельное прямому проводу, остается неизменным или практически почти неизменным, а поперечное магнитное поле, связанное с током i_1 будет убывать по мере удаления от оси прямого провода. Если ток i_1 начнет постепенно ослабевать при условии неизменности тока i_2, то шаг спиралевидных магнитных линий делается все больше и больше. В пределе, когда ток i_1 совсем прекратится, обратное преобразование спиралевидных магнитных линий закончится превращением их в систему магнитных линий, параллельных прямому проводу. Если же, при неизменности тока i_1, начнет постепенно ослабевать ток i_2, то процесс обратного преобразования спиральных магнитных линий закончится превращением их в кольцевые контуры, охватывающие прямой провод. Эти две системы магнитных линий (кольцевых и перпендикулярных им прямолинейных) при наложении их одна на другую, т. е. в случае отличных от нуля значений сил токов i_1 и i_2, уже не могут существовать раздельно и совершенно самостоятельно, но сливаются и преобразуются в единую общую систему спиралевидных магнитных линий.

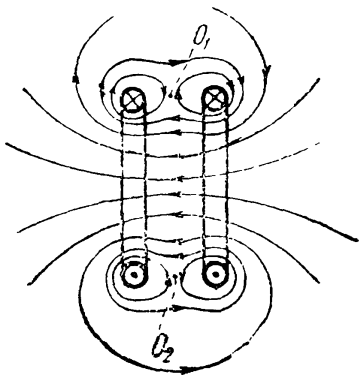


Рис. 37

Процессы слияния и обратного разделения магнитных линий в рассматриваемом случае преобразований магнитного потока, как и во всех ранее описанных случаях, могут происходить только путем сближения и последующего контакта некоторых участков противоположно направленных магнитных линий (особые точки O на предыдущих рисунках). Как именно это может осуществляться, данного вопроса мы специально коснемся в § 31.

Для того чтобы возможно было проследить спиралевидные магнитные линии на всем их протяжении, сосредоточим внимание на кольцевом проводнике A, по которому протекает ток i_1 и который окружен тороидальной обмоткой B с током i_2 (рис. 38). В этом случае всё будет происходить аналогично тому, о чем шла речь применительно к прямолинейному проводу и окружающей его длинной катушке. Образующиеся спиральные магнитные линии будут обвивать кольцевой провод A.

Одна подобная магнитная линия показана пунктиром на рис. 38. Здесь же тороидальная катушка B изображена в сечении плоскостью чертежа.

При рассмотрении данного случая преобразований магнитного потока иногда делают ошибочные выводы. Дело состоит в следующем. Математически, т. е. чисто формальным путем, можно показать, что, если отношение токов i_1 и i_2 иррационально, то при расположении проводников, представленном на рис. 38, в результирующем магнитном поле спиральные силовые линии (линии вектора магнитной силы H) не образуют замкнутых контуров, т. е. их непрерывность нарушается. При этом спиральные силовые линии, составляя одна продолжение другой, бесконечное число раз огибают кольцевой проводник с током i_1 и бесконечное число раз оборачиваются внутри тороидальной обмотки, а концы получающейся беспредельно длинной силовой линии не смыкаются. На основании такого рода соображений, совершенно безупречных с формальной стороны, делаются попытки говорить об опровержении принципа непрерывности магнитных линий, т. е. структурных составляющих магнитного потока.

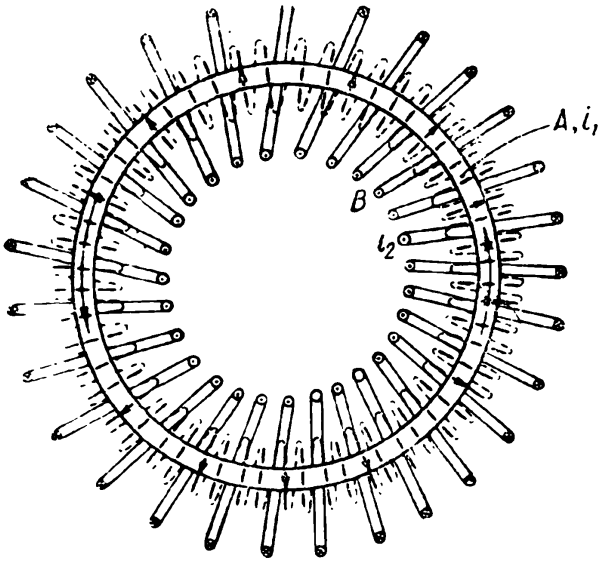


Рис. 38.

Подобное неправильное заключение является плодом ряда недоразумений и серьезных упущений. Первая, главная ошибка состоит в игнорировании объективной реальности магнитного потока в целом и его составляющих, в частности. Вторая ошибка проистекает из совершенно недопустимого смешения двух понятий, а именно понятия силовой линии, имеющего чисто математический характер, и понятия элементарной трубки магнитной индукции (магнитной линии), имеющего непосредственное отношение к реальным процессам в магнитном поле. Третья ошибка состоит в допущении, что отношение между двумя токами, i_1 и i_2, может *непрерывно* изменяться как угодно и, в частности, может быть иррациональным числом, т. е. не является отношением каких-либо двух целых чисел. Это эквивалентно утверждению, что электрический ток ни в коем случае не квантуется и может иметь какое угодно значение. В настоящее время такое утверждение в высокой степени рискованно, и, надо полагать, оно совершенно не соответствует действительности. Наоборот, анализ электромагнитных явлений привел современную физику к представлению о квантовании как об одном из основных моментов в разного рода процессах, относящихся к данной области. Трудно поэтому представить себе, чтобы явление, называемое нами электрическим током, было изъято из закона квантования. Здесь достаточно только напомнить следующее. Уже доказано, что количество электричества, движение которого вдоль проводника всегда является одной из сторон процесса тока в этом проводнике, может изменяться только скачками, т. е. квантуется. Сверх того, уже высказывалась мысль о том, что и самые скорости элементарных электрических зарядов, по всей вероятности, квантуются. Следовательно, нет достаточных оснований для допущения, что отношение двух токов может быть

числом иррациональным. Таким образом, сами собой аннулируются и обоснования рассматриваемой попытки опровергнуть принцип непрерывности магнитного потока.

Не может подлежать сомнению, что в рассматриваемом случае (рис. 38) спиралевидные магнитные линии всегда образуют безусловно замкнутые контуры. Сколько бы раз магнитная линия ни обвивала круговой провод A, она не может обрываться, и концы ее не могут обнаруживаться, но обязательно смыкаются в силу принципиальных свойств магнитных линий.

Нельзя забывать того, что математический анализ, в частности математические соотношения, весьма полезные и ценные при изучении различных явлений природы, могут дать нам точное описание общего хода рассматриваемых явлений, но в огромном большинстве случаев касаются лишь внешнего эффекта, обнаруживаемого в том или ином явлении и сравнительно мало или иногда решительно ничего не говорят нам о внутреннем содержании явления. К тому же математический анализ обычно имеет дело с непрерывными функциями, а в реальной обстановке мы на каждом шагу встречаемся с прерывностями.[1] Например при математическом анализе процессов, происходящих в электрическом поле, допускается, что количество электричества представляет собою непрерывную функцию ряда параметров, хотя это количество, как было только что указано, может изменяться только скачками. Можно привести много подобных примеров. В связи с этим выводы, полученные математическим путем, не должны быть применяемы для истолкования какого-либо физического процесса без предварительного обсуждения вопроса о том, в каких пределах они могут соответствовать действительной природе вещей. Сказанное имеет особенное значение в отношении микрофизических явлений. Во всяком случае следует иметь в виду, что язык и формы математического анализа не составляют сущности описания реальных явлений, но играют лишь вспомогательную, хотя и чрезвычайно важную роль при уточнении и развитии системы взаимно-согласованных физических представлений, имеющих прямое или косвенное отношение к изучаемому явлению. Только руководствуясь подобного рода соображениями, возможно избегнуть ошибок при трактовке полученных математическим путем результатов и достигнуть подлинного приближения к познанию действительной, а не воображаемой природы явления.

д. Остановим теперь внимание на преобразованиях магнитного потока в случаях, когда некоторый определенный проводник с током находится во внешнем магнитном поле, безразлично какого происхождения. Рассмотрим сначала основной случай, который имеет большое теоретическое значение и позволит нам в дальнейшем (см. § 32) сделать важные выводы относительно того, как именно протекает процесс электромагнитной индукции тока. Представим себе прямолинейный проводник, перпендикулярный плоскости чертежа (рис. 39) и расположенный, например, между полюсами N и S какой-либо магнитной системы. Допустим, что ток идет от нас. Магнитные линии этого тока, рассматриваемые сами по себе и вне какой бы то ни было связи с внешним магнитным полем, должны были бы образовывать круговые контуры, изображенные пунктиром на рис. 39, причем направление таких магнитных линий, при принятом направлении тока, будет соответствовать вращению по часовой стрелке. С другой стороны, магнитные линии внешнего магнитного поля, напра-

[1] См. Миткевич. Сборник „Основные физические воззрения". 3-е изд. АН СССР, 1939, стр. 142—147.

вленные от полюса N к полюсу S, т. е. в данном случае сверху вниз, должны были бы сами по себе итти приблизительно параллельным пучком (сплошные тонкие линии на рис. 39). В действительности же указанные две системы магнитных линий, накладываясь одна на другую, не могут сохранить свою обособленность, но взаимодействуют между собой и, претерпев соответствующие рассматриваемому случаю преобразования, сливаются в единое целое, т. е. образуют одну общую систему магнитных линий, схематически изображенную на рис. 40. Как видим, здесь с правой стороны от проводника обнаруживается весьма заметное сгущение, с левой же стороны — значительное разрежение магнитных линий. Это соответствует тому обстоятельству, что в двух рассматриваемых обособленно (рис. 39) системах магнитных линий эти линии вправо от проводника имеют одинаковое направление, именно сверху вниз, а с левой стороны — противоположное направление: магнитные линии тока

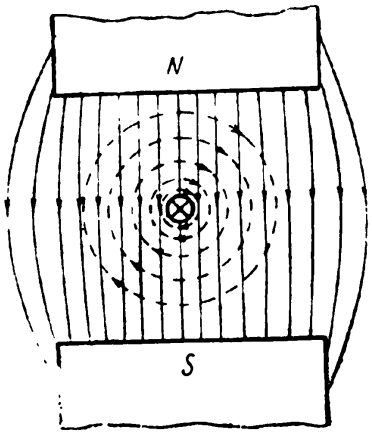


Рис. 39.

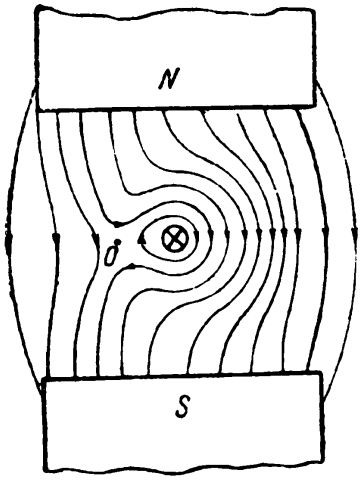


Рис. 40.

идут снизу вверх навстречу внешнему полю. Всякое последующее изменение во взаимном расположении проводника и внешнего магнитного поля, связанного в данном случае с полюсами N и S, обязательно будет сопровождаться дальнейшими преобразованиями магнитного потока, геометрически связанными с особой точкой O (рис. 40), где сближаются противоположно направленные участки магнитных линий, вступающие в соответствующее взаимодействие в процессе сращивания или разделения этих магнитных линий.

е. Если проводник, имеющий форму кольца, по которому идет ток, расположен во внешнем магнитном поле, подобном представленному на рис. 39, то он своим присутствием обусловит преобразования магнитного потока, весьма схематически иллюстрируемые рис. 41. Здесь представлена результирующая картина распределения магнитных линий для четырех различных взаимных расположений кольца, несущего ток, и полюсов NS (*I*, *II*, *III* и *IV*). Вместе с тем, на этом же рис. 41 жирными стрелками указано направление приложенных к кольцу механических сил, возникающих вследствие продольного тяжения и бокового распора деформированных магнитных линий. В позиции *I* момент пары сил, приложенных к кольцу, будет равен нулю. Кольцо находится в положении неустойчивого равновесия. Малейшее нарушение этого равновесия вызовет вращение кольца вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа. Допустим, что кольцо начало поворачиваться против часовой стрелки. В позиции *II* кольцо изображено повернувшимся от началь-

ного положения на 45°. Внешний магнитный поток еще не проник внутрь кольца, но уже намечается тенденция к такому преобразованию магнитных линий путем сращивания их в особых точках O_1 и O_2. В позиции *III* (при повороте кольца на 135°) это преобразование части магнитных линий показано осуществившимся. При дальнейшем поворачивании кольца продолжается преобразование магнитных линий и, наконец, в позиции *IV* (поворот на 180°) большая часть внешнего магнитного потока пронизывает кольцо, которое при этом приходит в положение устойчивого равновесия. В позиции *IV* внешний магнитный поток, сцепляющийся с кольцом, достигает своего возможного при данных условиях максимума. Вообще всегда, как известно, всякий проводящий контур, по которому проходит какой-либо постоянный ток, стремится принять во внешнем магнитном поле такое расположение, чтобы полный магнитный поток, охватываемый этим контуром и проходящий сквозь него в положительном направлении, был возможно больше. Все приложенные к контуру электромагнитные силы, т. е. механические силы электромагнитного происхождения, проявляются именно в такого рода

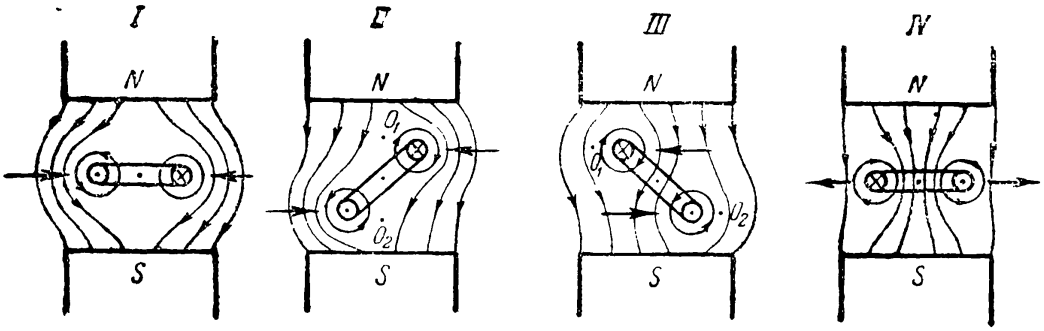


Рис. 41.

действиях: они стремятся соответствующим образом ориентировать контур тока и даже растянуть контур, чтобы охватываемая им площадь была как можно больше.

ж. В случаях, когда проводники, несущие ток, связаны тем или иным способом с какими-либо телами из ферромагнитных материалов, процессы преобразования магнитного потока в основном протекают так же, как и при отсутствии указанных материалов, но только в этих случаях привносится добавочное деформирование магнитных линий. Благодаря высокой магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, практически применяемых обычно в виде железа и его сплавов, части, изготовленные из них, привлекают в себя магнитные линии, вызывая тем самым более или менее значительное изменение их формы.

В качестве примера на рис. 42 схематически показано распределение магнитных линий в случае зубчатого якоря динамомашины. В результате происшедших преобразований магнитные линии якорной обмотки в основном слились с магнитными линиями внешнего магнитного поля, связанного с полюсами *N* и *S*, и образуется общий магнитный поток, сильно искривленный в областях, прилегающих к полюсным поверхностям. И такое распределение магнитного потока еще осложняется добавочным деформированием его вследствие наличия зубцов, которые являются главными проводниками потока в местах вхождения его в якорь.

На рис. 43 представлено сгущение магнитных линий, соответствующее внесению в однородное поле шара из какого-либо ферромагнитного материала. Обычно этот случай преобразований магнитного потока рассматривают как простое деформирование магнитных линий, обусло-

вленное тем, что вещество шара обладает большой магнитной проницаемостью. Однако по существу и здесь окончательное распределение магнитного потока является несомненным результатом сращивания некоторых магнитных линий внешнего поля с элементарными магнитными потоками атомного или молекулярного масштаба, входящими в состав микрофизических процессов электромагнитного характера во всем объеме рассматриваемого шара. Принимая во внимание естественную подвижность структурных составляющих обычного вещества, можно сказать, что в случае ферромагнитного шара, внесенного во внешнее магнитное поле, всё происходит в основном так же, как и при внесении какого-либо кольцевого тока во внешнее магнитное поле (рис. 41), когда окончательная картина распределения магнитных линий (позиция *IV*) весьма подобна изображенной на рис. 43. Но только в последнем случае мы имеем интегральный эффект чрезвычайно большого числа внутриатомных токов.

Подобного же рода соображения можно высказать и относительно случая внесения в магнитное поле шара из диамагнитного вещества, когда

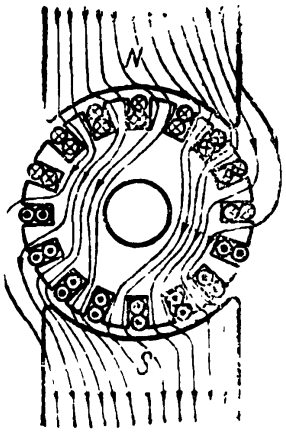


Рис. 42.

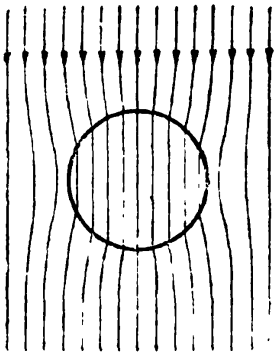


Рис. 43.

получается разрежение магнитных линий в объеме шара (рис. 44). Чисто формально это обычно объясняется меньшей величиной магнитной проницаемости у диамагнитных веществ, чем у „пустоты" (эфира) или у воздуха. Существо же явления, надо полагать, заключается в том, что хотя атомы диамагнитных веществ и оказываются сами по себе как бы нейтральными в магнитном отношении, т. е. их магнитные моменты равны нулю, однако, в них вследствие индуктивного действия внешнего поля возникают дополнительные токи, всегда так направленные, что эти токи противодействуют проникновению внешнего поля внутрь атомов. В итоге получается картина, аналогичная изображенной на позиции *I* рис. 41. Таким образом, между рис. 44 и рис. 41 (позиция *I*) нет принципиального различия. Наоборот, здесь есть глубокая внутренняя связь.

3. Соображения, изложенные по поводу приведенных выше примеров преобразования магнитного потока, далеко не исчерпывают всего того, что можно сказать об этом. Из огромного количества возможных нами было сосредоточено внимание на сравнительно небольшом числе примеров, в которых более или менее отчетливо прослеживаются характерные особенности подобных процессов, представляющих собою совершенно необходимое условие протекания какого бы то ни было электромагнитного явления. В дальнейшем мы неоднократно будем иметь случай коснуться этих же примеров и ряда других.

§ 27. О непрерывных преобразованиях замкнутых пространств

а. В предыдущем параграфе мы описали в самых общих чертах ряд случаев преобразования магнитного потока. Процессы сращивания и разделения магнитных линий на первый взгляд могут показаться находящимися в противоречии с принципом непрерывности магнитного потока, согласно которому каждая магнитная линия всегда образует замкнутый контур, ни при каких условиях не могущий претерпевать разрыв. В особенности маловероятным представляется допущение, что процесс разделения одного контура магнитной линии на два самостоятельных и совершенно обособленных контура может не сопровождаться хотя бы весьма кратковременным разрывом исходной магнитной линии. Однако, всё то, что известно о свойствах магнитного потока, позволяет утверждать: *концов магнитной линии в природе не существует.* Таким образом, речь идет о таких преобразованиях магнитных линий, при которых их непрерывность никогда не нарушается. Для выяснения

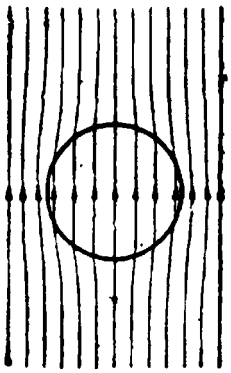


Рис. 44.

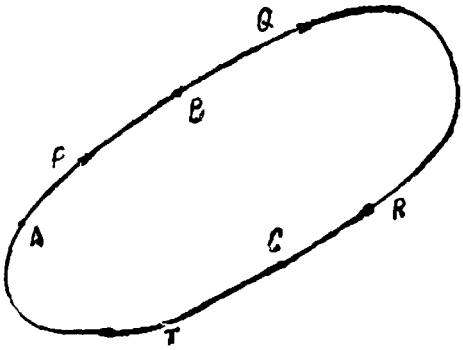


Рис. 45.

этого вопроса целесообразно подвергнуть его специальному рассмотрению с чисто геометрической точки зрения, имея в виду, что математические и геометрические закономерности всегда отражают в себе в той или иной степени действительные соотношения и свойства различных физических реальностей.

Установим сначала, что именно необходимо понимать в качестве непрерывного преобразования замкнутых пространств (замкнутых поверхностей и т. д.). При этом под замкнутостью пространства мы будем разуметь то обстоятельство, что данное пространство, без какого-либо перерыва в нем, ограничивает собой некоторое пространство высших измерений, т. е. например, замкнутая кривая охватывает собой некоторую поверхность, замкнутая поверхность охватывает собой некоторый объем трехмерного пространства и т. д.

Всякое преобразование, связанное с каким бы то ни было изменением формы замкнутого пространства любого числа измерений, мы будем называть *непрерывным*, если во все время этого процесса выполняется следующее условие:

Некоторая точка всегда может непрерывно двигаться в пределах данного замкнутого пространства в произвольном направлении, не встречая никаких препятствий для продолжения этого движения.

б. Рассмотрим теперь случай замкнутого одномерного пространства, т. е. случай кривой, образующей какой-либо замкнутый контур (рис. 45). Точка A может двигаться непрерывно вдоль этой кривой в одном и том

же направлении, например по часовой стрелке, проходя последовательно по участкам P, Q, R и T. Подвергнем затем данную кривую деформированию, в результате которого произвольно выбранные точки B и C, лежащие на кривой, придут в соприкосновение и сольются в точке O (рис. 46). Получается кривая в форме восьмерки с двумя замкнутыми контурами, I и II, касающимися друг друга в точке O. В продолжение всего промежутка времени, пока кривая сохраняет эту усложненную форму, при которой точка O оказывается принадлежащей двум различным частям первоначально недеформированной кривой, точка A может попрежнему беспрепятственно совершать движение вдоль рассматриваемого контура, теперь уже деформированного. При этом точка A будет опять последовательно перемещаться вдоль участков P, Q, R и T в направлении, указаном стрелками, дважды совпадая с точкой O за время полного обхода всего контура. Однако точка A в этом случае может, дойдя по участку P до точки O, без всяких препятствий на своем пути перемещаться далее не по участку Q, а по участку R и лишь после того — по участку Q, обходя таким образом вновь образовавшийся контур II в направлении против часовой стрелки. Пройдя затем вторично через точку O, точка A может продолжать свое движение вдоль участка T и возвратиться в начальное положение, завершив полный обход основного

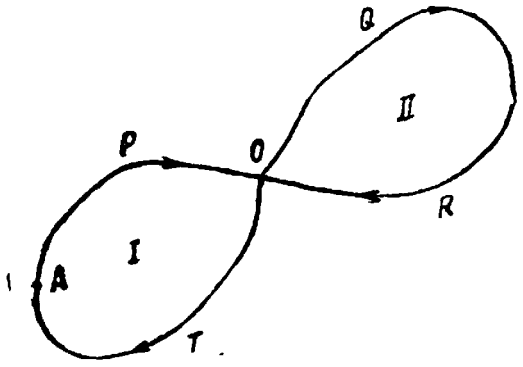


Рис. 46.

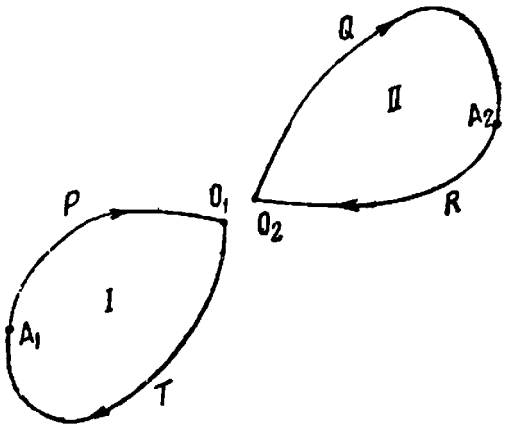


Рис. 47.

замкнутого контура, имеющего перехват в точке O. Можно представить себе, наконец, что точка A, дойдя по участку P до точки O, начнет далее перемещаться по участку T и минует участки Q и R, совершая движение по замкнутому контуру I, или же что точка A совсем перейдет на замкнутый контур II и будет перемещаться вдоль него в том или ином направлении, совершенно затем минуя участки P и T.

Во всех рассмотренных случаях точка A может беспрепятственно совершать свое перемещение, нигде не останавливаясь.

Поэтому необходимо признать, что контакт точек B и C (рис. 45) и слияние их в точке O (рис. 46) ни в малейшей степени не нарушил непрерывности основного контура. В то же время наметились совершенно самостоятельные контуры I и II, касающиеся один другого в точке O. Сохраняя замкнутость и непрерывность каждого из них, мы можем прекратить их касание, несколько раздвинув их (рис. 47). Здесь точками O_1 и O_2 обозначены следы точки O, объединявшей раньше эти две точки. Получаются обособленные замкнутые контуры I и II, никак между собой теперь не связанные и могущие быть затем удаленными друг от друга на какое угодно расстояние. Некоторые точки A_1 и A_2 могут совершать непрерывный обход, каждая вдоль соответствующего замкнутого контура I или II.

Процесс *непрерывного разделения* основного замкнутого контура (рис. 45) на два совершенно самостоятельных и раздельных замкнутых контура *I* и *II* (рис. 47) вполне возможно провести и в обратном порядке, т. е. в порядке *непрерывного сращивания* (слияния) двух обособленных замкнутых контуров *I* и *II* (рис. 47) в один замкнутый контур (рис. 45). При этом, конечно, необходимо опять пройти через стадию, изображенную на рис. 46 и получаемую в данном случае путем сближения контуров *I* и *II* до контакта точек O_1 и O_2, обратно сливающихся в точку O, которую мы раньше рассматривали как результат совмещения точек B и C (рис. 45). Раздвигая затем точки B и C, а также надлежащим образом обратно деформируя полученную кривую, мы приходим, наконец, к исходному замкнутому контуру (рис. 45).

Итак, мы проследили все стадии непрерывного преобразования замкнутого одномерного пространства. Оно может в процессе разделения непрерывно преобразовываться в два обособленных и совершенно самостоятельных замкнутых одномерных пространства или в процессе сращивания с другим подобным же одномерным пространством непрерывно преобразовываться в единое замкнутое одномерное пространство, заключающее в себе два исходных.

Так как физические реальности никогда не бывают одномерными, но принципиально трехмерны, то рассмотренная схема непрерывных преобразований может до некоторой степени служить для руководства лишь в том случае, когда какая-либо физическая реальность по своей геометрической форме весьма приближается к замкнутому линейному контуру. Сказанное относится, между прочим, к контуру электрического тока, протекающего по очень тонкому проводнику, а также к контуру элементарной трубки магнитной индукции, так как диаметр трубки подобного рода, по всей вероятности, чрезвычайно мал по сравнению с полной длиной замкнутого контура, образуемого трубкой. Непрерывных преобразований контура тока мы коснемся в следующем параграфе, вопросу же о непрерывных преобразованиях магнитного потока, т. е. по существу — о непрерывных преобразованиях элементарных трубок магнитной индукции (элементарных магнитных линий), посвящена вся настоящая Глава IV. В последующем изложении (см. рис. 52—56) мы специально остановимся именно на непрерывном преобразовании трубчатых поверхностей.

в. Рассмотрим далее случай непрерывного преобразования замкнутого двухмерного пространства, т. е. случай какой-либо замкнутой поверхности, например поверхности S, представленной на рис. 48 в сечении ее плоскостью чертежа. Любая точка, лежащая на данной поверхности, беспрепятственно может перемещаться по ней в каком угодно направлении. Допустим затем, что поверхность S начинает деформироваться таким образом, чтобы в некоторой части ее образовалось сужение или шейка G (рис. 49). Продолжая указанное деформирование замкнутой поверхности, т. е. образование сужения G, до предела, мы в конце концов достигнем того, что это сужение превратится в точку O (рис. 50). В данной стадии преобразования начальной замкнутой поверхности S получаются по существу уже две замкнутые поверхности S_1 и S_2, которые имеют только одну общую точку O. Этот контакт поверхностей S_1 и S_2 позволяет еще считать их связанными между собою частями единой поверхности S (рис. 48 и 49). Некоторая точка на поверхности S_1 может в своем непрерывном движении перейти через точку O и продолжать дальнейшее перемещение по какой-либо кривой, лежащей на поверхности S_2. Рассматриваемая точка может потом вновь пройти через точку O и возвратиться в пределы поверхности S_1 и т. д. Эта возмож-

ность свободного перехода движущейся точки через неподвижную точку касания O в любом направлении и дает основание попрежнему говорить, в данной стадии преобразования двухмерного пространства, о поверхности S, но только значительно деформированной. Вместе с тем, однако, можно представить себе, что в пределах замкнутых поверхностей S_1 и S_2 две различные точки совершают непрерывное перемещение так, что каждая из них все время остается на соответствующей поверхности S_1 или S_2, не переходя через точку касания O на другую поверхность. Возможно, конечно, что движущаяся точка в некоторые моменты проходит через точку O, всё же оставаясь в дальнейшем в пределах той же поверхности S_1 или S_2. В этом отношении точка O не является запрещенной. Указанная возможность непрерывного движения какой-либо точки либо по поверхности S_1, либо по поверхности S_2 останется полностью неизменной, если будет нарушен контакт этих двух поверхностей и они будут отодвинуты одна от другой, как это показано на рис. 51. Но в таком случае мы будем

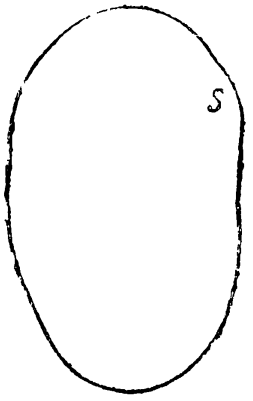


Рис. 48.

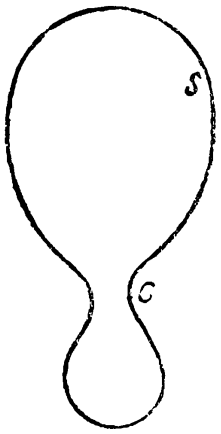


Рис. 49.

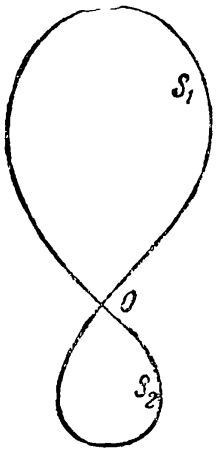


Рис. 50.

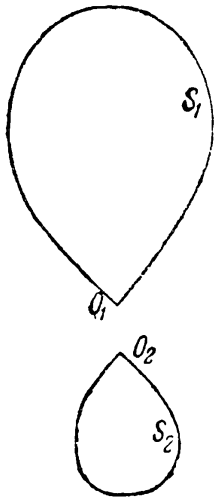


Рис. 51.

уже иметь две совершенно обособленные замкнутые поверхности S_1 и S_2, не находящиеся ни в какой геометрической связи между собой.

Рассмотренный процесс последовательного преобразования одного замкнутого двухмерного пространства в два самостоятельных пространства можно представить себе происходящим в обратном направлении. Действительно, две замкнутые поверхности S_1 и S_2 (рис. 51) мы можем сблизить до совмещения точек O_1 и O_2, которые сольются в точку O (рис. 50). В этой стадии обратного преобразования возможно уже говорить о единой замкнутой поверхности (рис. 49), настолько деформированной, что в ней имеется бесконечно узкий перехват. Дальнейшим изменением формы поверхности, которое должно сопровождаться расширением этого перехвата, мы достигаем, наконец, полного восстановления единой поверхности S (рис. 48).

Итак, замкнутое двухмерное пространство может претерпевать непрерывные преобразования в двух направлениях. В процессе разделения оно может последовательно и без какого бы то ни было нарушения его непрерывности преобразоваться в два совершенно обособленных двухмерных же замкнутых пространства. В процессе сращивания (слияния) данного двухмерного замкнутого пространства с другим подобным пространством оба эти пространства, существовавшие раньше раздельно, преобразуются в единое двухмерное замкнутое пространство, опять-таки без всякого нарушения их непрерывности.

В природе встречается очень много случаев, которые можно рассматривать в качестве примеров непрерывного преобразования двухмерных замкнутых пространств. Дело в том, что все физические тела трехмерны и поэтому они всегда бывают ограничены двухмерными принципиально замкнутыми пространствами, т. е. замкнутыми поверхностями. Хотя с точки зрения микрофизических процессов современная наука и затрудняется в определении абсолютного точного объема какого-либо тела, однако во всяком случае мы всегда принимаем за поверхность тела некоторую замкнутую поверхность, ограничивающую объем, с которым обычно связываются все основные и наиболее характерные свойства данного тела, отличающие его от другого тела. При всяком разделении физического тела на отдельные части и при всяком соединении физических тел в единое целое мы, следовательно, встречаемся с непрерывным преобразованием замкнутых поверхностей. Так, при образовании капель жидкости или при слиянии двух капель в одну каплю большего размера, происходит непрерывное преобразование поверхностей капель, даже с внешней стороны очень подобное тому, что иллюстрируется рис. 48—51. Такого же рода схема непрерывных преобразований замкнутых поверхностей соблюдается и в известном опыте с мыльными пленками в форме так называемых пузырей. Именно, один мыльный пузырь легко может быть преобразован в два самостоятельных пузыря путем соответствующего деформирования основного пузыря сильной струей воздуха. Обратный опыт слияния двух мыльных пузырей в один общий, имеющий только наружную пленку, удается сравнительно редко, так как во многих случаях большой мыльный пузырь, образовавшийся через присоединение двух малых пузырей друг к другу, сохраняет внутри поперечную пленку, которая разделяет две полости.

Опыт с разделением одного мыльного пузыря на два особенно интересен в том отношении, что здесь весьма отчетливо демонстрируется действительное отсутствие каких бы то ни было разрывов в пленке. Дело в следующем. Как известно, малейшее нарушение непрерывности пленки, например протыкание ее сколь угодно тонкой нагретой иглой, немедленно сопровождается стягиванием всего вещества пленки в каплю жидкости, что просто объясняется наличием у пленки сравнительно большого поверхностного натяжения. Таким образом, преобразование одного мыльного пузыря в два отдельных пузыря необходимо рассматривать в качестве экспериментального доказательства того, что процессы подобного рода действительно могут происходить без всяких разрывов преобразуемой поверхности, т. е. непрерывно.

г. Мы рассмотрели с геометрической точки зрения вопрос о непрерывных преобразованиях замкнутой поверхности, ограничивающей односвязное пространство трех измерений. По существу то же можно сказать и о поверхностях, ограничивающих многосвязные пространства. Рассмотрим в виде примера трубчатую замкнутую поверхность T (рис. 52), ограничивающую некоторое двухсвязное пространство. Случай этот имеет прямое отношение к непрерывным преобразованиям магнитного потока. Подвергнем трубчатую поверхность T следующим преобразованиям геометрического характера. Прежде всего изогнем данную трубку так, чтобы две произвольные точки B и C, лежащие на ее поверхности, пришли в контакт и слились в точке O, являющейся точкой касания двух участков одной и той же трубчатой поверхности (рис. 53). Представим себе, далее, что в том месте, где находится точка O, образуется шейка G (рис. 54) благодаря соответствующему деформированию элементов поверхности, сходившихся в точке O. Продолжая деформирование трубки в том

же направлении и надлежащим образом сужая общую часть G, которая теперь соединяет собой части T_1 и T_2, входившие раньше в состав простой трубчатой поверхности T (рис. 52), мы дойдем до касания этих частей T_1 и T_2 в одной точке O' (рис. 55). В данной стадии преобразований уже совершенно отчетливо видно разделение трубки T на две самостоятельные и опять-таки замкнутые трубки T_1 и T_2, имеющие между собой геомет-

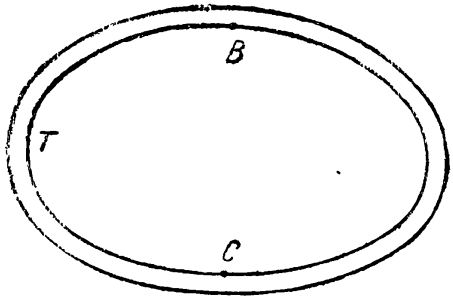


Рис. 52.

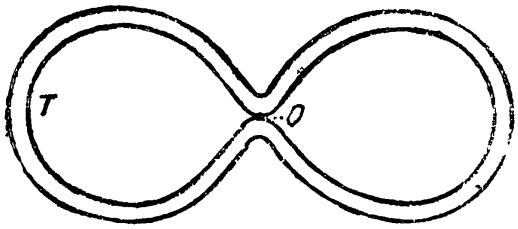


Рис. 53.

рическую связь только в одной точке касания O'. Мы можем прервать и эту последнюю связь, раздвигая трубки T_1 и T_2 (рис. 56). Получаем, таким образом, две вполне обособленные замкнутые трубки.

Во всех стадиях описанного геометрического преобразования, связанного с разделением одной замкнутой трубки T на две обособленные замкнутые же трубки T_1 и T_2, было соблюдено условие непрерывности.

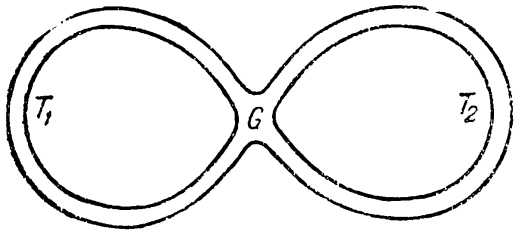


Рис. 54.

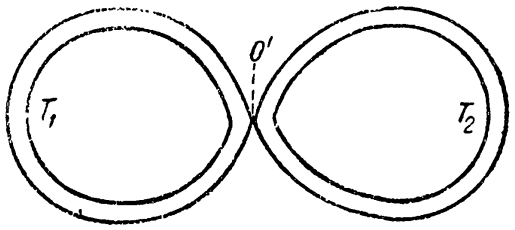


Рис. 55.

Действительно, какие-либо точки, расположенные на данных трубчатых поверхностях и неизменно остающиеся на них, могут во всё время процесса преобразования непрерывно двигаться в произвольном направлении, не встречая никаких препятствий для продолжения своего движения. Следовательно, мы имели дело с непрерывным преобразованием замкнутых трубчатых поверхностей.

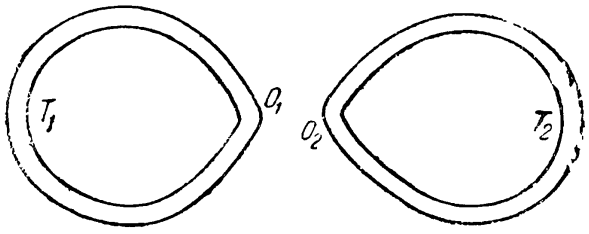


Рис. 56.

Совершенно очевидно, что и в данном случае мы можем провести обратный процесс сращивания замкнутых трубчатых поверхностей T_1 и T_2. Для этого необходимо только пройти все рассмотренные стадии процесса в обратном порядке, начиная с контакта точек O_1 и O_2 (рис. 56). И такое преобразование замкнутых трубчатых поверхностей будет, конечно, также строго непрерывным.

Рассмотренное непрерывное преобразование трубчатой поверхности, прямое (рис. 52, 53, 54, 55 и 56) или обратное (рис. 56, 55, 54, 53 и 52), в точности соответствует тому, что необходимо представить себе в случаях разделения или сращивания трубок магнитной индукции любого поперечного сечения.

д. Развивая вышеизложенные рассуждения в отношении замкнутых пространств высшего числа измерений, мы формально, в порядке экстраполяции, выйдем за пределы трехмерного пространства. При этом мы всегда будем в состоянии доказать выполнимость основного условия непрерывных преобразований пространств. Таким образом, замкнутое пространство любого числа измерений *непрерывным преобразованием* может быть разделено на два совершенно обособленных замкнутых пространства и, обратно, два обособленных замкнутых пространства, вообще, могут быть слиты в одно замкнутое пространство путем *непрерывных же преобразований*. Мы не будем, однако, дальше углубляться в рассмотрение этого вопроса и ограничимся сказанным, так как физические реальности, с которыми мы имеем дело при изучении явлений природы, всегда и неизменно всегда остаются в пределах нормального трехмерного пространства.

§ 28. Аналогии непрерывных преобразований магнитного потока. Струи жидкости. Цепи электрического тока.

а. В ряде явлений, наблюдаемых нами в реальной обстановке, мы нередко встречаемся с примерами преобразований, вполне аналогичных непрерывным преобразованиям магнитного потока. Рассмотрим некоторые из таких аналогий и в первую очередь остановимся на случае преобразования струй какой-либо жидкости.

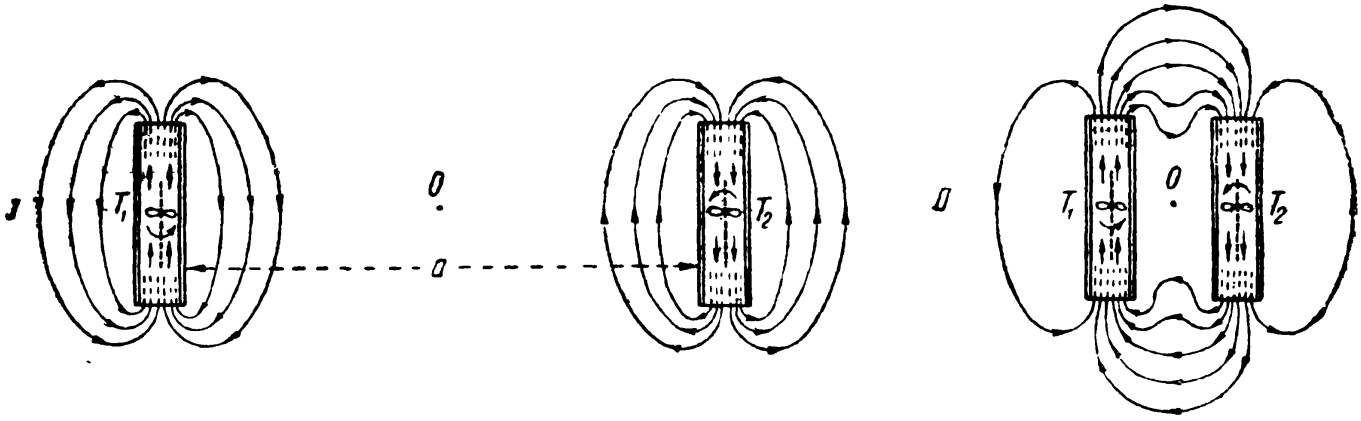


Рис. 57.

Мы знаем, что при установившихся условиях турбулентного движения, когда некоторое элементарное количество жидкости многократно проходит один и тот же путь вдоль определенной замкнутой кривой, объем, занимаемый жидкостью, можно мысленно разбить на большое число замкнутых трубчатых поверхностей, которые оказываются весьма характерными для турбулентного движения. Внутри любой подобной трубки движение жидкости совершается, вообще говоря, только вдоль оси трубки тангенциально к поверхности трубки, т. е. движущаяся жидкость не имеет составляющих скорости, нормальных к данной поверхности. Вследствие этого количество жидкости внутри трубки остается неизменным. Получается замкнутая струя жидкости. Всякое же изменение установившегося режима будет сопровождаться преобразованием струй, и если в жидкости имеется несколько центров турбулентного движения, то такого рода преобразование может быть связано со слиянием или разделением струй.

Представим себе неограниченный объем некоторой жидкости, например воды. Поместим в воде две сравнительно короткие металлические трубки T_1 и T_2, открытые с обоих концов (рис. 57). В средней части

каждой трубки расположим какой-либо механизм для возбуждения движения воды сквозь трубку. Допустим, что в качестве такого механизма применен гребной винт соответствующих размеров, вращающийся вокруг оси, совпадающей с осью трубки. На рис. 57 изображено в очень схематическом виде общее распределение получающихся струй воды. Позиция *I* этого рисунка иллюстрирует случай, когда рассматриваемые две трубки, параллельные одна другой, разделены расстоянием a, которое может быть сколь угодно большим. В этом случае две системы струй, внутри левой трубки направленных, скажем, снизу вверх, а внутри правой трубки — сверху вниз, существуют в воде совершенно раздельно и могут не иметь ничего общего между собой. Но картина будет изменяться по мере сближения трубок T_1 и T_2, и при достаточно малом расстоянии между ними большинство струй сольется в общую для обеих трубок систему (позиция *II*, рис. 57). Выходя из верхнего конца левой трубки T_1, струи воды будут в основном затягиваться теперь через верхний же конец правой трубки T_2 внутрь этой трубки, затем они проходят сквозь правую трубку сверху вниз, выходят из ее нижнего конца и вновь затягиваются нижним же концом трубки T_1. Пройдя сквозь левую трубку в направлении снизу вверх, некоторый элементарный объем жидкости завершит, наконец, свой полный обход по замкнутому контуру струи, общей для трубок T_1 и T_2 и т. д.

Ясно, конечно, что при обратном переходе от позиции *II* к позиции *I*, т. е. при раздвижении трубок T_1 и T_2, струи воды, общие для обеих трубок, претерпят преобразование разделения на самостоятельные обособленные контуры, связанные только с одной трубкой (рис. 57, *I*).

Все рассмотренные преобразования водяных струй, их сращивание и разделение несомненно должны быть связываемы со сближением и контактом в точке *O* противоположно направленных участков струй. Во время этих процессов в области пространства около точки *O* должны иметь место какие-то перераспределения, в результате которых и происходит слияние или разделение контуров струй, в зависимости от того, в какую сторону направлено преобразование.

Преобразования струй жидкости удовлетворяют условиям непрерывности. Во всё время этих преобразований любая частица жидкости, входящая в состав той иной струи, может двигаться, не встречая никаких препятствий на пути своего перемещения. *Следовательно, есть полное основание говорить о непрерывном преобразовании струй жидкости вообще.*

Схему непрерывных преобразований потока некоторой жидкости, в которой имеются два центра турбулентного движения (позиции *I* и *II*, рис. 57), мы построили применительно к тому, что изображено на рис. 24 (позиции *I* и *II*), где были иллюстрированы основные положения Фарадея, касающиеся непрерывных преобразований магнитного потока. Это было сделано с целью отчетливого демонстрирования аналогичности двух разобранных случаев. Действительно, достаточно сопоставить рис. 24 и 57 и сравнить их для того, чтобы усмотреть полное сходство между ними с точки зрения геометрических условий непрерывного преобразования всяких замкнутых трубчатых поверхностей. Условия же эти были нами специально рассмотрены в предыдущем параграфе (см. рис. 52—56). Но мало того. Здесь аналогия имеет более глубокий смысл, чем простое сходство чисто геометрического характера. В обоих случаях основная стадия преобразования происходит около некоторой особенной точки *O*, где сближаются до полного совмещения физические процессы противоположного направления. В этом именно и заключается

сущность рассмотренной аналогии непрерывных преобразований магнитного потока.

6. Остановимся теперь на примере преобразований контура электрического тока. Представим себе некоторую цепь тока, содержащую два источника электродвижущей силы G_1 и G_2, два магазина сопротивлений R_1 и R_2 и два измерительных прибора A_1 и A_2 (рис. 58). Цепь замкнута, и по ней идет ток, который в каждый момент времени можно контролировать, пользуясь приборами A_1 и A_2. Как известно, надлежащим подбором сопротивлений R_1 и R_2 в данной обстановке мы будем в состоянии сделать разность потенциалов между какими-либо точками B и C равной нулю. В таком случае не произойдет никаких изменений в силе тока, если мы приведем в контакт точки B и C, соответственным образом изогнув проводники цепи. Стрелки измерительных приборов A_1 и A_2 сохранят неизменным свое отклонение. На рис. 59 показана рассматриваемая электрическая цепь в деформированном виде, когда точки B и C уже

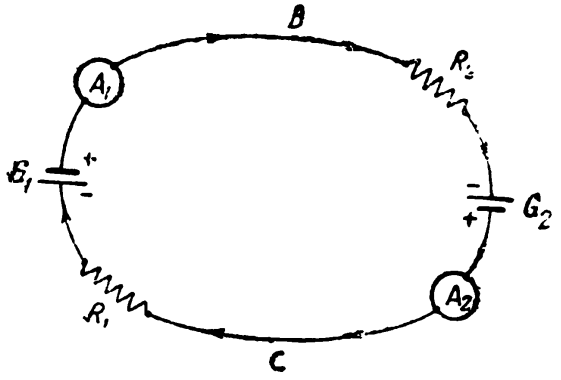


Рис. 58.

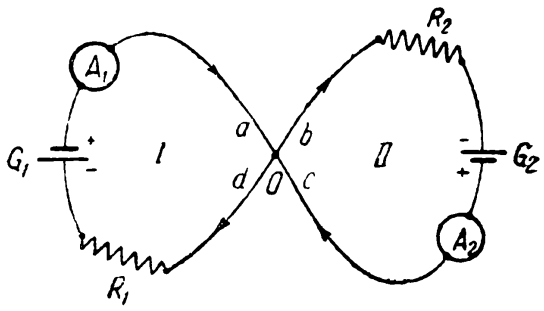


Рис. 59.

слились в одну точку O. Можно, конечно, попрежнему говорить, что ток от генератора G_1 направляется через прибор A_1 в сопротивление R_2, пройдя в данном случае через точку O. Затем ток идет через G_2, A_2, опять-таки через точку O, через R_1, и в генераторе G_1 заканчивается цикл обхода вдоль полного контура. Можно, однако, рассуждать теперь и иначе. На рис. 59 уже совершенно четко обнаруживаются два самостоятельных контура I и II, которые возникли из основного контура путем его разделения на две части, имеющие пока лишь одну общую точку O. В контуре I ток от генератора G_1 можно считать замыкающимся только через прибор A_1 и сопротивление R_1, минуя точку O. В контуре же II ток от генератора G_2 проходит в таком случае только через прибор A_2 и сопротивление R_2, не заходя через точку O в другую цепь. Обособленность цепей I и II можно сделать полной, разрезав основные проводники в точке O при неизменном соблюдении соединения участков a и d, с одной стороны, и участков b и c, с другой стороны. Затем можно просто отодвинуть цепи I и II одну от другой. Получим картину, изображенную на рис. 60. Таким образом, из одной цепи (рис. 58) мы получили две обособленные цепи (рис. 60), *ни на момент не прерывая и даже не изменяя электрического тока.*

Указанное преобразование цепей возможно провести и в обратном направлении. Сближая цепи I и II (рис. 60) до контакта точек O_1 и O_2, мы получим расположение этих цепей, показанное на рис. 59. Затем разрезаем проводники в точке O так, чтобы неизменно сохранялось электри-

ческое соединение между участками a и b, с одной стороны, и между участками c и d, с другой стороны. Наконец, изгибая обратно проводники надлежащим образом, можем восстановить геометрическую форму цепи, изображенную на рис. 58.

Опыт с рассмотренным преобразованием электрических цепей очень легко и удобно можно осуществить, пользуясь схемой, представленной на рис. 61. Здесь все части схемы в основном те же, что и на рис. 58—60, но только необходимые пересоединения выполняются при посредстве особого штепсельного коммутатора k. Этот коммутатор состоит из четырех массивных медных пластин приблизительно квадратной формы, хорошо изолированных одна от другой и вместе образующих больший квадрат. В промежутках между четырьмя пластинами находятся пять штепсельных гнезд. Вставляя штепсель в центральное гнездо O, мы будем соединять накоротко все четыре пластины. Вставляя же штепсель в одно из гнезд *1*, *2*, *3* или *4*, мы будем соединять накоротко только какие-либо две рядом расположенные пластины, между которыми находится то или иное гнездо. Таким образом, имея три штепселя, мы можем легко осуществлять все необходимые переключения.

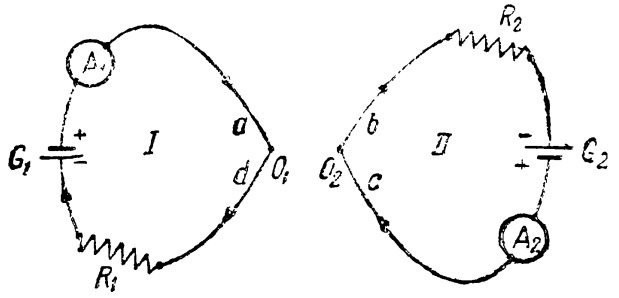


Рис. 60.

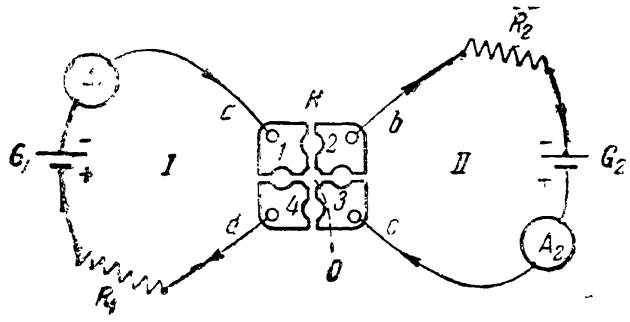


Рис. 61.

К каждой пластине присоединен один из четырех проводников, которыми заканчиваются участки цепи a, b, c и d. Вставив штепсели в гнезда *2* и *4*, мы получим цепь, изображенную на рис. 58. Подбором сопротивлений R_1 и R_2 добиваемся того, чтобы разность потенциалов между верхней и нижней парами пластин была равна нулю. Затем вставляем третий штепсель в центральное гнездо O. Получаем схему, показанную на рис. 59, где уже образуются самостоятельные цепи *I* и *II*. Теперь переставляем два штепселя из гнезд *2* и *4* в гнезда *1* и *3*. При этой перестановке штепселей установившиеся в рассматриваемой сложной цепи токи практически не претерпят никаких изменений, которые могли бы быть обнаружены измерительными приборами A_1 и A_2. Наконец, вынимая средний штепсель из гнезда O, мы осуществим полное разделение образовавшихся двух самостоятельных контуров, левого и правого, и придем к схеме рис. 60. Описанными переключениями мы выполним, следовательно, преобразование разделения одного контура тока на два совершенно не связанных между собою контура, по которым протекают теперь токи, не имеющие ничего общего. Для проведения обратного преобразования, т. е. для осуществления сращивания двух отдельных контуров с независимыми токами в один общий контур, вводим сначала штепсель в центральное гнездо O, затем переставляем два крайних штепселя из гнезд *1* и *3* в гнезда *2* и *4* и, наконец, вынимаем средний штепсель из центрального гнезда O.

Весьма существенно то обстоятельство, что *во всё время описан-*

ного преобразования электрических цепей (прямого и обратного) эти цепи остаются неизменно замкнутыми и ток нигде не прерывается. Мы убеждаемся в этом путем непосредственного опыта, наблюдая по измерительным приборам. Следовательно, такого рода преобразования электрических токов действительно относятся к категории *непрерывных преобразований.*

Обратим еще внимание на следующее. И в рассмотренной второй аналогии непрерывных преобразований магнитного потока мы производили контакт между некоторыми двумя точками, лежащими на таких участках преобразуемых контуров, в которых физические процессы, в данном случае — электрические токи, имеют противоположное направление. Места указанного контакта были обозначены буквой O на рис. 59—61.

Если мы стремимся вообще констатировать только отсутствие разрывов в цепях, а не неизменность протекающих по ним токов, то во время вышеописанных опытов непрерывного преобразования электрических цепей нет особой надобности приводить к нулю разность потенциалов между соединяемыми накоротко точками цепи. Наблюдение по приборам A_1 и A_2 вполне позволяет убедиться в том, что самый процесс электрического тока в преобразуемых цепях никогда не прерывается.

в. Непрерывные преобразования электрических цепей (их разделение и сращивание) приобретает очень простой характер в случае, когда мы имеем дело со сверхпроводниками. Так как сверхпроводящая цепь не обладает электрическим сопротивлением ($r=0$), то падение потенциала (ri) вдоль каждого отдельного участка такой цепи равно нулю и для поддержания раз возникшего в ней тока не требуется наличия какого-либо постоянно действующего генератора. Все точки сверхпроводящей цепи имеют один и тот же электрический потенциал.

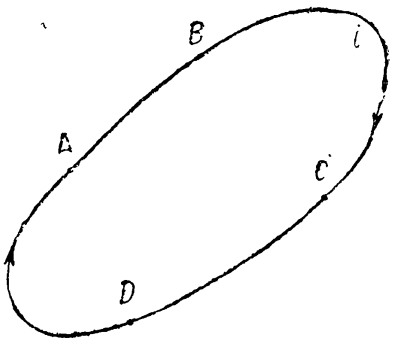


Рис. 62.

Рассмотрим некоторую сверхпроводящую цепь, по которой идет ток i (рис. 62). Предположим, что проводники этой цепи допускают их деформирование. Мы можем в таком случае приводить в соприкосновение любые две точки данной цепи (например, устанавливать контакт между точками A и C, или A и D, или B и C, или же B и D и т. п.) без того, чтобы нарушился процесс электрического тока, имевший место в сверхпроводящей цепи перед самым моментом этого контакта. Получим схему цепи, подобную изображенной на рис. 59. Затем мы можем произвести разделение двух образовавшихся контуров и раздвинуть их, как показано на рис. 60.

Можно осуществить и сращивание сколь угодно большого числа сверхпроводящих цепей, несущих токи, в один общий контур, действуя в обратном порядке, подобно тому как это было рассмотрено применительно к рис. 60—58.

Что касается силы тока в подвергающихся преобразованию сверхпроводящих цепях, то она может, как известно, претерпевать некоторые изменения в связи с изменением коэффициентов самоиндукции деформируемых контуров тока (см. § 51 Главы VI), но это не имеет непосредственного отношения к существу вопроса о непрерывных преобразованиях.

Во всяком случае электрический ток ни в одной из преобразуемых сверхпроводящих цепей не прекратится ни на момент, т. е. все эти преобразования будут совершаться *непрерывно.*

§ 29. Аналогии непрерывных преобразований магнитного потока. Вихревые кольца

а. В предыдущем параграфе мы ознакомились с некоторыми примерами процессов, аналогичных непрерывным преобразованиям магнитного потока. Целесообразно остановить внимание на рассмотрении еще одного примера, особенное значение которого состоит в том, что в этом случае речь будет итти о преобразованиях вихревых нитей. Дело в следующем. Как указывалось уже раньше (§ 5 Главы I), Максвелл, неоднократно касавшийся сущности магнитных явлений, считал весьма правдоподобной мысль о наличии каких-то специфических вихревых движений в магнитном поле. Идя по пути, намеченному Максвеллом, мы можем, следовательно, рассматривать реальные составляющие магнитного потока, т. е. элементарные трубки магнитной индукции или магнитные линии, как замкнутые вихревые нити в эфире. Естественно возникает вопрос: обладают ли вихревые нити вообще способностью претерпевать преобразования, подобные тем, которые происходят в системе магнитных линий при различных электромагнитных процессах? Иными словами, могут ли какие бы то ни было замкнутые контуры вихревых нитей, независимо от того, в какой среде они образовались, сращиваться и сливаться, а также могут ли они разделяться, сохраняя при этом все основные признаки вихревых колец? В связи с более или менее сложным характером движений, происходящих в вихревых нитях, в этом отношении возможны и вполне законны некоторые сомнения.

Гельмгольц подверг теоретическому анализу вихревое движение в несжимаемой жидкости, лишенной всякой вязкости, т. е. внутреннего трения, и названной им в этом смысле „идеальной“ (см. § 5 Главы I). Он показал, что в безграничной „идеальной“ жидкости вихревое движение может осуществляться только при условии, что ось вихря всегда образует вполне замкнутый контур. В этой форме вихревое движение представляет собою замкнутую вихревую нить или вихревое кольцо. Некоторые теоретические выводы Гельмгольца, касающиеся вихревых колец, были затем подтверждены опытами с дымовыми кольцами в воздухе. Вопроса же о слиянии и о разделении вихревых колец он не обследовал. На первый взгляд самая мысль о возможности подобных преобразований совершенно исключается. Ведь одно из весьма важных следствий, полученных Гельмгольцем, четко и ясно гласит, что в безграничной „идеальной“ жидкости вихревые кольца никакими физическими средствами не могут быть прерваны так, чтобы проявились концы вихревой нити. Можно, однако, говорить не о разрыве контура вихревого кольца в жидкости без внутреннего трения (в эфире), а о таком *непрерывном* преобразовании вихревых колец (об их сращивании или разделении), которое не сопровождалось бы никакими разрывами этих колец.

При постановке эксперимента с вихревыми кольцами в целях обнаружения чего-либо, аналогичного преобразованиям магнитного потока, всегда необходимо иметь в виду, что вследствие вязкости обычной материальной среды вихревые кольца в ней будут очень скоро рассеивать свою энергию и исчезать, в то время как магнитные вихри мы должны мыслить в эфире, т. е. в среде, совершенно свободной от вязкости и могущей благодаря этому обусловить сколько угодно длительное существование подобных вихрей. Всё это должно быть, конечно, учтено, но во всяком случае, казалось бы, в течение своего кратковременного существования (например, в воздухе) вихревые кольца должны как-то проявить себя в искомом направлении. Хотя бы в незначительной сте-

пени или в виде слабого намека должны же они обнаружить способность сращиваться и сливаться вместе в один общий контур, а также способность разделяться на обособленные контуры или кольца. Так должно быть, если справедливо предположение, что магнитные линии действительно являются какими-то вихревыми нитями.

Опыт дает определенно положительный ответ на поставленный вопрос о том, могут ли вихревые кольца в воздухе претерпевать сращивания и разделения.[1]

6. Для того чтобы вихревые кольца в воздухе можно было легко наблюдать, обычно взвешивают в воздухе какие-либо мельчайшие частицы, своею окраской выделяющие контуры кольца и делающие его видимым. Проще всего это достигается при посредстве, например, табачного дыма. Таким образом получаются известные „дымовые кольца".

В качестве генератора дымовых колец в описываемых опытах было применено устройство, представленное в своих основных чертах на рис. 63. Была взята камера K, изготовленная из плотного картона и имевшая следующие размеры: основание — 14×20 см^2, лицевая сторона 20×26 см^2 (приблизительно). В лицевой стороне камеры было вырезано круглое отверстие диаметром в 15 см, которое могло плотно закрываться сменными картонными же дисками P, прижимавшимися и закреплявшимися при помощи шести особых задвижек. Сменные диски P несли на себе, в зависимости от условий опыта, — одну, две, три или, наконец, четыре трубки T. На рис. 63 показаны две таких трубки T_1 и T_2. При соответствующем нажатии на заднюю стенку заполненной дымом камеры K или при ударе в среднюю часть этой стенки от конца каждой трубки T отделялось вихревое кольцо, двигавшееся дальше в направлении оси трубки. Нажатие на заднюю стенку чаще всего производилось просто рукой. Удар же об эту стенку осуществлялся при помощи деревянного молотка M, закрепленного на длинном стержне, который мог отклоняться, поворачиваясь вокруг горизонтальной оси, поддерживаемой двумя стойками на верхней части камеры K. Противовес Q служил для регулирования силы удара. Молоток мог взводиться на некоторую определенную высоту и в этом положении он удерживался с помощью специальной защелки, связанной с небольшой педалью. Нажимая педаль в надлежащий момент, можно было спустить молоток M, который отскакивал после удара о заднюю стенку камеры K и немедленно задерживался второй защелкой во избежание повторных ударов. Все эти автоматические приспособления, равно как и некоторые другие вспомогательные части, полезные в ходе эксперимента, не изображены на рис. 63, чтобы не усложнять чертежа и выделить только наиболее существенные части прибора. Для наполнения камеры K табачным

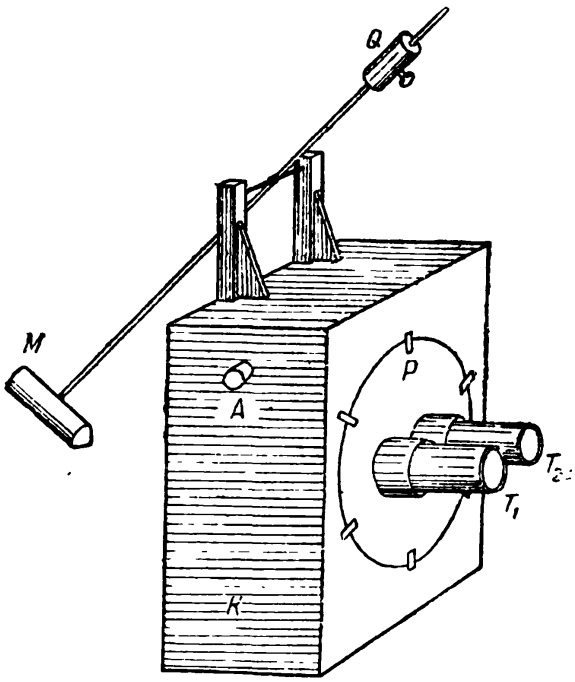


Рис. 63.

[1] Описываемые опыты с дымовыми кольцами были выполнены мною в 1938—1940 гг.
В. Миткевич.

дымом в ее боковой стенке было проделано особое отверстие A, которое плотно закрывалось пробкой. При этом обычно применялось вспомогательное устройство, состоявшее из небольшой коробки, более или менее непроницаемой для воздуха и снабженной двумя трубочками. Надлежащим образом поместив внутрь этой коробки зажженную папиросу и продувая сквозь коробку воздух посредством резиновых шаров, присоединенных к одной трубочке, можно было получать струю густого табачного дыма, выходящего из другой трубочки. Через отверстие A в камеру K вводился конец трубочки, дававшей струю дыма, и таким образом, перед каждой серией наблюдений над вихревыми кольцами камера заполнялась дымом от одной или двух папирос.

Характер дымовых колец, получаемых при помощи описываемого прибора, при прочих равных условиях очень зависит от степени и быстроты нажатия на заднюю стенку камеры K или от силы удара об эту стенку со стороны молотка M. При сравнительно слабом нажатии дымовые кольца получаются, так сказать, вялые. Они движутся очень медленно, проходя всего лишь 1—2 м в секунду, и вскоре распадаются. Мы будем называть такие дымовые кольца медленными. В случае же

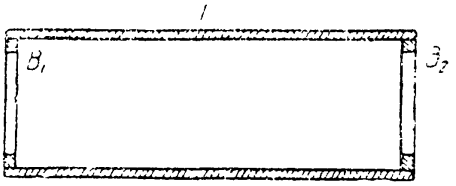


Рис. 64.

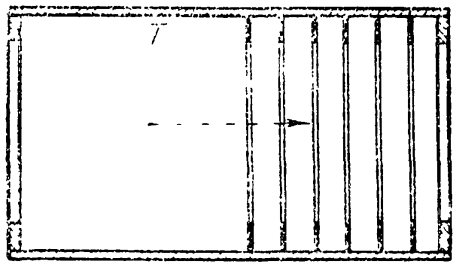


Рис. 65.

энергичного и сильного нажатия или в случае сильного удара молотком дымовые кольца получаются более мощные и быстро движущиеся, так что их можно хорошо проследить на протяжении до 10 м и даже дальше. Эти дымовые кольца мы будем в дальнейшем называть быстрыми (скорость — от 5 до 10 м в секунду).

Необходимо сказать несколько слов о деталях устройства трубок T, из которых выходят отдельные дымовые кольца. Вообще говоря, можно получить дымовое кольцо при помощи любой простой трубки. Опыт, однако, показал, что некоторые специальные добавления, сделанные внутри трубки, улучшают условия генерирования надлежащих дымовых колец и облегчают получение с ними искомого эффекта. В ряде случаев дело сводилось к тому,что начало и конец трубки снабжались вставленными внутрь кольцами B_1 и B_2 (рис. 64), уменьшавшими диаметр отверстий трубки на величину от 5 до 12 мм. В опытах применялись подобного рода трубки с диаметром отверстий, выбрасывающих дымовые кольца, равным приблизительно 25 и 35 мм. Длина трубок была в различных случаях от 60 до 80 мм. Трубки такого рода пригодны для генерирования как медленных, так и быстрых дымовых колец. Особенно подходящей для получения очень медленных дымовых колец оказалась конструкция трубки T, показанная на рис. 65. У выходного конца трубки на равных расстояниях размещалось внутри ее несколько колец с тем же проходным отверстием, что и на концах трубки. Иногда для регулирования скорости выходящих дымовых колец на конец трубки насаживалась манжета C, которая выдвигалась на 20—30 мм (рис. 66).

С целью сохранения запаса дыма, наполнявшего камеру K, а также во время наполнения ее дымом концы трубок закрывались особыми покрышками, снимавшимися или автоматически отодвигавшимися в сторону перед генерированием дымовых колец.

Само собой разумеется, что трубки T располагались на диске P вокруг его центра симметрично. Расстояние между осями трубок было от 60 до 80 мм.

Две, три или четыре трубки T устанавливались на соответствующем диске P наклонно в отношении нормали к диску и при этом так, чтобы их оси сходились в точке, отстоящей на расстоянии от 1 до 2 м от диска. В зависимости от обстоятельств наклон трубок T мог изменяться, что достигалось применением нежесткого крепления трубок на диске. На рис. 63 видны некоторые детали этого крепления. В надлежащих местах на диске прочно приклеивались патрубки длиною в 20—25 мм, внутрь которых с легким трением вставлялись начала трубок T, снабженные снаружи проволочным кольцом, охватывавшим каждую трубку. Зазор, образовавшийся между внутренней поверхностью патрубка и наруж-

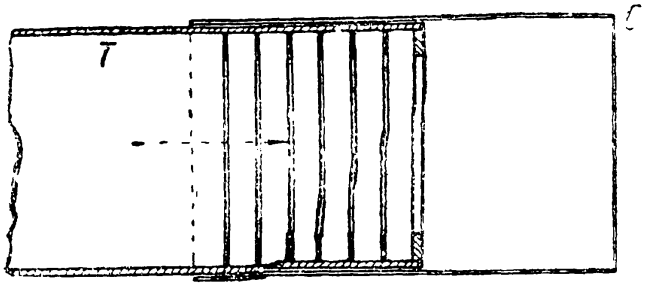


Рис. 66.

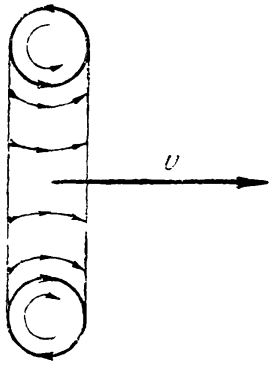


Рис. 67.

ной поверхностью трубки, заполнялся ватой. Получалось нечто, напоминавшее шаровое сочленение и позволявшее в известных пределах легко изменять наклон трубок T.

Опыт, вообще говоря, хорошо удавался в условиях спокойного состояния воздуха. В связи с этим обычно применялись экраны, располагаемые по сторонам пути прохождения дымовых колец и по возможности устраняющие вредные движения воздуха. Вторым обстоятельством, которое оказывало сильное влияние на протекание взаимодействий между дымовыми кольцами, было соотношение между скоростями поступательного движения колец. Необходимо добиваться того, чтобы дымовые кольца, входящие в состав наблюдаемой группы, все двигались с одной и тою же скоростью. Сверх того желательно также, чтобы все дымовые кольца данной группы одновременно выбрасывались концами трубок T. Выполнения всех указанных условий в достаточной степени, как показал опыт, возможно достигнуть.

Что касается наивыгоднейшего освещения движущихся дымовых колец, то можно указать, что они очень отчетливо видны при встречном солнечном свете. Применялось и искусственное освещение сильной электрической лампой в 400 ваттов, помещавшейся со стороны генератора дымовых колец. В этом случае дымовые кольца были весьма хорошо видимы на черном матовом фоне.

в. Переходя к изложению результатов опытов с преобразованием дымовых колец, необходимо предварительно остановиться еще на вопросе о направлениях, характеризующих вихревое движение в этих кольцах.

Еще Гельмгольц установил, что направление поступательного движения всякого вихревого кольца нормально к поверхности, охватываемой кольцом, и совпадает с направлением тех составляющих вращательного движения, которые имеют место сквозь указанную поверхность. На рис. 67 представлено некоторое вихревое кольцо в разрезе, и рядом стрелок указано направление вращательных движений в этом кольце. Жирная стрелка v соответствует направлению скорости поступательного движения вихревого кольца. Это же кольцо изображено на рис. 68 расположенным в плоскости чертежа. Ясно, конечно, что при том направлении вращательного движения, которое здесь показано (сплошные кривые стрелки), вихревое кольцо будет совершать свое поступательное движение в направлении от нас, за плоскость чертежа. Замкнутая пунктирная линия на рис. 68 есть ось или средняя линия вихря. Направление этой линии, отмеченное на ней стрелками, взято в соответствии с правилом правого винта, которое условно связывает направление магнитного потока с направлением электрического тока в контуре, охватывающем данный магнитный поток. Соблюдая это правило, мы можем, вместо того, чтобы

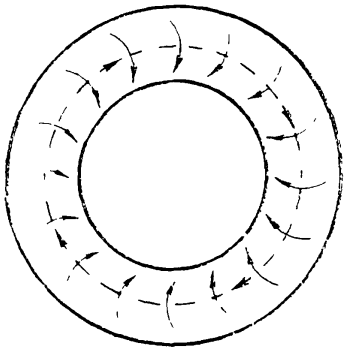


Рис. 68.

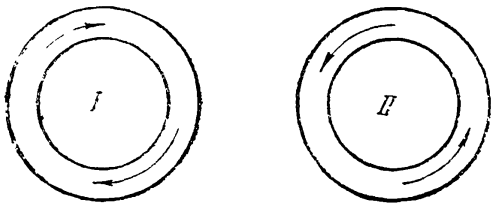


Рис. 69.

показывать направление вращательного движения в каком-либо рассматриваемом вихре, помечать только соответствующее ему направление средней линии вихря, как это сделано на рис. 69. При простом взгляде на этот рисунок мы сразу же видим, что вихревое кольцо *I* совершает поступательное движение в направлении от нас за плоскость чертежа, а кольцо *II* — из-за плоскости чертежа к нам. В ряде случаев можно совершенно опускать изображение контуров вихревого кольца и ограничиваться только указанием осевой (средней) линии кольца, отмечая при этом, конечно, всякий раз направление в данном замкнутом контуре (рис. 70).

Во всяком случае, зная направление вихревого движения, хотя бы условно показываемое подобно тому, как на рис. 70, мы всегда знаем, в какую сторону стремится поступательно перемещаться то или иное вихревое кольцо, *совершенно независимо от обстоятельств, сопровождавших его возникновение.*

г. Остановимся сначала на преобразованиях, которые наблюдаются в системе из двух дымовых колец, перемещающихся поступательно рядом друг с другом. Это должны быть кольца, в которых вихревое движение направлено одинаково. Пользуясь методом условного обозначения направлений этого движения, представленным на рис. 69 и 70, мы можем сказать, что рассматриваемые вихревые кольца оба имеют направление, например, по часовой стрелке, т. е. удаляются от нас за плоскость чертежа (рис. 71). Такие одинаково направленные и сближенные дымовые

кольца оказываются в очень неустойчивом состоянии. Они стремятся еще более сблизиться и вступить в контакт друг с другом в некоторой средней точке. В момент контакта очень быстро совершаются какие-то процессы перераспределения, которые трудно было проследить детально. В данном случае было бы, конечно, весьма ценно применение кинематографической съемки с большим числом кадров в секунду. Это позволило бы выяснить немало подробностей, интересных в теоретическом отношении.

Немедленно после контакта раздельные кольца уже не существуют. Они *срастились* в общий контур, который объединяет теперь оба

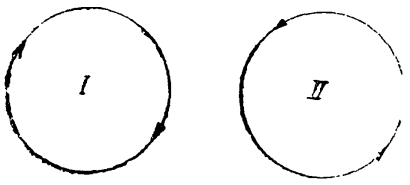


Рис. 70.

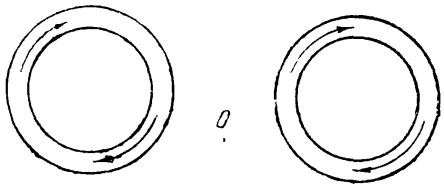


Рис. 71.

дымовых кольца (рис. 72). Эта стадия преобразований очень кратковременна. За ней быстро следует картина, представленная на рис. 73, являющаяся результатом стремления вихря принять форму кольца, что обычно, наконец, и получается (рис. 74). Таким образом, два дымовых кольца, вначале совершенно обособленных (рис. 71), в процессе преобразований сращиваются и сливаются в одно кольцо (рис. 74), в состав которого исходные вихревые образования входят как части. При этом диаметр результирующего дымового кольца приблизительно в два раза больше, чем у каждого из начальных колец, которые обычно имели диаметр около 40 мм.

Во всё время описываемых преобразований дымовые кольца безостановочно продолжают свое нормальное поступательное движение.

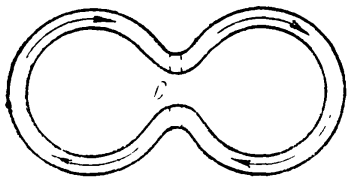


Рис. 72.

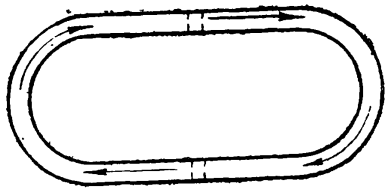


Рис. 73.

В качестве любопытной подробности можно указать на тот факт, что нередко в местах сращивания двух дымовых колец можно заметить очень короткие и довольно резко очерченные участки, в которых дым имеет более бледную окраску, как будто бы на этих участках дым несколько рассеялся. Это, конечно, вполне вероятно, так как в момент контакта происходит некоторый, так сказать, бурный процесс. В условиях „неидеальной" жидкости, в которых протекает опыт с дымовыми кольцами, не исключена возможность того, что благодаря вязкости воздуха имеет место хотя и незначительное, но всё же заметное смешение дыма в области контакта с окружающим более чистым воздухом. На рис. 72—74 пунктирными линиями отмечены указанные участки дымового кольца. Эти слабее окрашенные участки разграничивают две половины результирующего кольца. Ясно, что одна половина его образовалась из левого дымового кольца (рис. 71), а другая половина — из правого. В ряде

случаев подобного рода пограничные участки легко позволяют иметь суждение о структуре дымового кольца, получившегося через преобразование исходных колец.

Правильная форма дымового кольца, изображенная на рис. 74, обычно не сразу приходит в устойчивое состояние. В огромном большинстве случаев наблюдаются вибрации этого кольца. По инерции оно, образовавшись из вытянутого в горизонтальном направлении замкнутого контура (рис. 73), начинает в этом же направлении суживаться и вытягиваться в вертикальном направлении, причем иногда даже образуется сужение в средней части, как показано на рис. 75 (участки p и q около точки O). Затем вихревой контур возвращается к круговой форме, вновь вытягивается в горизонтальном направлении, опять принимает круговую форму и т. д., пока не затухнут, наконец, вибрации и не установится окончательно круговая форма дымового кольца. Частота описываемых вибраций обычно была около 3—4 полных циклов в секунду.

Преобразование двух дымовых колец в одно общее при надлежащей

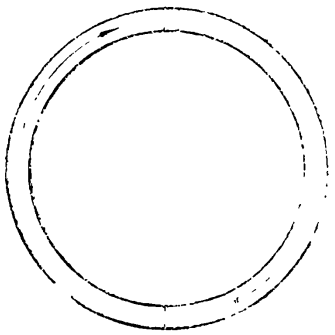


Рис. 74.

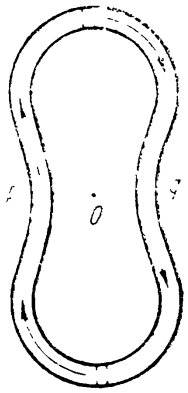


Рис. 75.

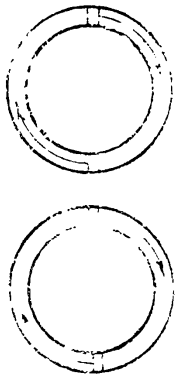


Рис. 76.

обстановке (спокойное состояние воздуха и т. д.) наблюдается очень часто и достигается без всяких особых затруднений. Но изредка удавалось наблюдать еще следующее. В связи с какими-то, повидимому случайными, благоприятствующими движениями воздуха вибрирующее дымовое кольцо, приняв форму, показанную на рис. 75, иногда продолжало суживаться дальше в месте перехвата до контакта участков p и q в точке O. В таком случае происходит обратное преобразование одного контура дымового вихря в два дымовых кольца, находящихся теперь одно над другим (рис. 76). Наблюдается, следовательно, и *разделение* дымового кольца на два самостоятельных кольца меньших размеров.

На рис. 76 пунктиром отмечены упоминавшиеся выше более бледные пограничные участки колец. На каждом дымовом кольце их теперь по два, соответственно двум пройденным этапам преобразований: предварительному сращиванию и последующему разделению, происходившему в условиях повторного контакта уже иных участков колец. Принимая это во внимание, мы можем утверждать, что левые половины обоих колец рис. 76 раньше образовывали одно левое кольцо рис. 71, а правые полукольца рис. 76 раньше были частями одного правого кольца рис. 71.

Объединяя все описанные преобразования двух дымовых колец в общую схему, получаем сводный рис. 77, где эти кольца условно изображены простыми линиями, на которых стрелками указано направление вихрей, а поперечными черточками отмечены пограничные участки, образовавшиеся в местах бывших контактов.

Начальная и конечная стадии, *1* и *7*, различаются между собой с внешней стороны только расположением дымовых колец. По существу же в них произошла перестановка отдельных полуколец, как разъяснено было выше. Стадия *2* непосредственно следует за контактом двух исходных дымовых колец, стадия же *6* предшествует второму контакту. Стадии *3* и *5* различаются лишь растянутостью по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Дымовое кольцо стадии *4*, имеющее вдвое больший диаметр, чем каждое из колец *1* и *7* стадии, является результирующим в процессе *сращивания* двух колец стадии *1* и исходным вихревым кольцом в процессе разделения его на два кольца стадии *7*. В указанной на рис. 77 последовательности все эти стадии преобразования дымовых вихрей *(1—7)* нередко проходят перед глазами наблюдателя совершенно отчетливо и наглядно.

На рис. 24 изображена схема преобразований магнитного потока, иллюстрирующая основные высказывания Фарадея по этому поводу. Сосредоточив внимание на двух соответствующих магнитных линиях, совершенно обособленных в случае раздвинутых магнитов $N_1 S_1$ и $N_2 S_2$ (позиция *I*), мы можем мысленно проследить их контакт при сближении магнитов во время перехода к позиции *II*, где эти магнитные линии показаны уже срастившимися и слившимися в один общий контур. Здесь всё

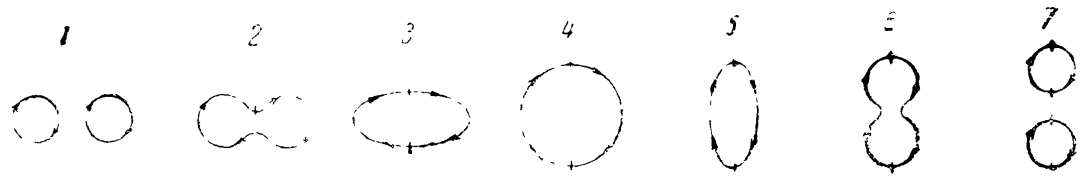


Рис. 77.

происходит вполне аналогично тому, что представлено стадиями *1—4* на рис. 77. В случае же обратного раздвижения магнитов $N_1 S_1$ и $N_2 S_2$ происходит разделение рассматриваемого общего контура магнитной линии на два обособленных контура аналогично последовательному переходу от стадии *4* к стадии *7* на рис. 77.

К сказанному о преобразованиях дымовых колец добавим еще следующее. Как процесс слияния, так и процесс разделения вихревых образований непосредственно связан с контактом таких двух участков вихрей, направления которых прямо противоположны (см. точки *O* на рис. 72 и 75). И в этом отношении мы встречаемся с полной аналогией тому, что происходит при описанных раньше преобразованиях магнитного потока (см. точки *O* на рис. 26—31, 34 и 40).

д. Опыты с преобразованием двух дымовых колец были проведены в основном с медленными кольцами. С такими же кольцами велись и наблюдения над преобразованием трех дымовых колец. Здесь также обнаружено слияние их в одно общее кольцо, носящее на себе следы трех бывших контактов в виде трех пограничных участков, отчетливо замечаемых иногда благодаря их сравнительно бледной окраске. Прежде чем результирующее вихревое кольцо окончательно примет устойчивую круговую форму, оно, как и в случае преобразования двух колец, быстро и сильно вибрирует подобно тому, что схематически представлено на рис. 78. Стадия *1* соответствует начальному расположению трех дымовых колец, между центрами которых в описываемых опытах было расстояние около 60 мм. После сращивания этих колец в один общий контур наблюдалась переходная стадия *2*, характеризуемая своей формой, которая напоминает равносторонний треугольник с притупленными углами.

В стадии *2* вершина треугольника оказывалась вверху. Затем получалось круглое кольцо (стадия *3*) приблизительно тройного диаметра по сравнению с исходными дымовыми кольцами. Далее, вибрирующий контур вихря принимал треугольную форму с основанием наверху (стадия *4*). Снова получалось круглое кольцо (стадия *5*), в стадии *6* в общем повторялась та же форма, которая была в стадии *2*, опять — кольцо (стадия *7*), в стадии *8* — опять опрокинутый треугольник и т. д., пока вибрации, наконец, не затухали. Окончательно устойчивая форма круглого кольца обычно достигалась к моменту, когда энергия вихря оказывалась уже исчерпанной и он рассеивался, тем самым прекращая свое существование. Никаких обратных преобразований, т. е. разделения вибрирующего общего контура на обособленные дымовые кольца, в данном случае не удавалось наблюдать.

Были произведены еще опыты с преобразованием четырех рядом идущих дымовых колец в один общий контур. При этом обычно применялись быстрые дымовые кольца. Ничего существенно нового с четырьмя кольцами не наблюдалось. Без особых затруднений достигалось сращивание четырех вихревых колец в один контур. Иногда, вследствие некоторого различия скоростей поступательного движения, отдельные кольца

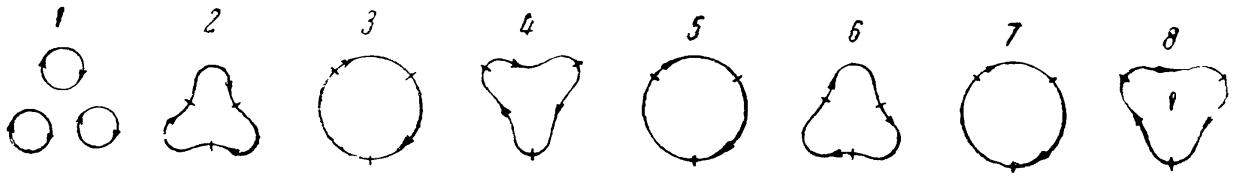


Рис. 78.

отставали от других или упреждали их, и тогда процесс преобразования ограничивался слиянием только двух или трех колец. В связи со сравнительно быстрым движением дымовых колец не удалось достаточно отчетливо подметить наличие вибраций, подобных тем, которые были наблюдены в случае слияния двух или трех колец (рис. 77 и 78). После слияния быстрых дымовых колец результирующий контур, казалось, сразу же принимает форму кольца.

е. В опытах с двумя дымовыми кольцами вопрос о возможности сращивания и разделения замкнутых вихрей принципиально был уже разрешен в положительном смысле. Поэтому экспериментирование с тремя и четырьмя дымовыми кольцами на первый взгляд может представляться совершенно излишним. Однако дело обстоит не совсем так. При слиянии трех или четырех вихревых колец мыслимо было ожидать наличия одного добавочного явления, которое по существу исключается в случае слияния двух таких колец, когда они сращиваются, полностью входя в получаемый общий контур как его части. Для того чтобы пояснить сказанное, рассмотрим внимательнее, какие именно участки преобразуемых трех или четырех вихревых колец могли войти в состав результирующего кольца, в действительности наблюдаемого.

За моментом взаимного контакта трех колец в точках O_1, O_2 и O_3 (стадия *A*, рис. 79) непосредственно следует стадия *B*, соответствующая появлению уже срастившегося общего контура *I*, который мы до сих пор, собственно говоря, только и имели в виду. Но совершенно очевидно, что участки *a*, *b* и *c*, расположенные между точками контакта вблизи центра всей системы колец, не могли войти в состав контура *I*. В него вошло лишь по $^5/_6$ от каждого исходного вихревого кольца, а участки *a*, *b* и *c*,

в сумме имеющие длину, равную половине одного из основных колец, также срастившись, должны были слиться и образовать второй замкнутый контур *II*, как это ясно видно на рис. 79 (стадия *B*). При этом контур *II* естественно оказывается направленным обратно контуру *I*.

Подобная же схема преобразований будет иметь место и при слиянии четырех вихревых колец. Четыре точки контакта O_1, O_2, O_3 и O_4 (рис. 80, стадия *A*) ограничивают участки *a*, *b*, *c* и *d*, находящиеся между данными точками вблизи центра. Каждый из этих участков представляет собою $^1/_4$ вихревого кольца, подвергающегося преобразованию в рассматриваемом случае. Немедленно после контакта будем иметь стадию *B*, представленную на том же рис. 80. Здесь опять-таки мы имеем два самостоятельных вихревых контура *I* и *II*, причем участки *a*, *b*, *c* и *d* не вошли в состав

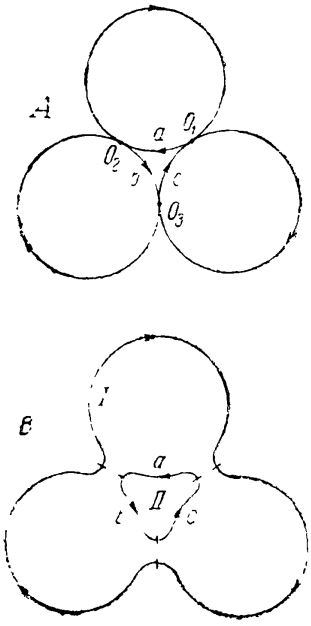


Рис. 79.

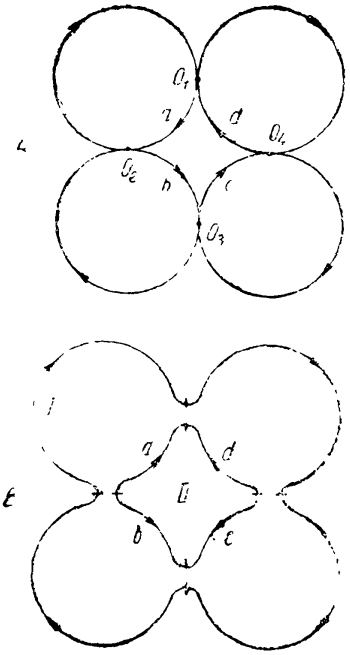


Рис. 80.

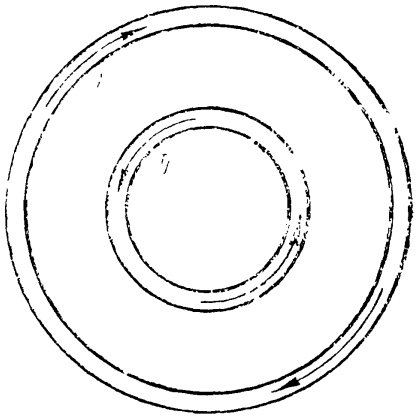


Рис. 81.

контура *I*, а срастились и слились в контур *II*. И в данном случае получившиеся обособленно два замкнутых вихря имеют взаимно противоположные направления.

Вообще всегда при подобном преобразовании произвольного числа вихревых колец, большего двух, должно получаться не одно результирующее кольцо, а два противоположно направленных контура вихрей *I* и *II* (рис. 81). При очень большом числе сращиваемых колец оба результирующих контура должны получаться почти одинаковых размеров.

В описанных опытах с тремя и четырьмя дымовыми кольцами не удавалось обнаружить внутреннего кольца *II*. Причина этого состоит, повидимому, в следующем. В центральной части системы сращиваемых 3 или 4 колец свободное пространство оказывалось весьма ограниченных размеров. Поэтому поступательное движение дымовых колец должно было сопровождаться увлечением воздуха в средней части системы. Образовавшееся после контактов дымовое кольцо *II* стремилось двигаться в обратном направлении. Указанное же увлечение воздуха в области появления кольца *II* могло принудительно удерживать его на месте, а возможные паразитные движения воздуха могли ускорить рассеяние его. В таком случае, вместо кольца *II*, должно было бы наблюдаться лишь некоторое дымовое облачко, остающееся на месте. Именно это

в ряде случаев и удавалось подметить. Надо полагать, что значительное увеличение числа сращиваемых дымовых колец, например экспериментирование с 10—20 кольцами, располагаемыми по окружности соответственно большого диаметра, позволило бы отчетливо наблюдать возникновение второго дымового кольца *II*. Нельзя себе представить, чтобы этого не произошло.

Указанные подробности процесса сращивания ряда вихревых колец интересны в том отношении, что они вполне аналогичны некоторым особым случаям преобразований магнитного потока. Об этом будет речь еще впереди, когда мы коснемся симметричных преобразований магнитного потока (см. §§ 35 и 37).

ж. Деление одного дымового кольца на два обособленных кольца с достаточной отчетливостью было наблюдено в качестве обратного преобразования двух предварительно сравшихся колец (рис. 71—77). Для выяснения некоторых деталей процесса преобразования вихрей была сделана попытка осуществить деление дымового кольца еще иным способом.

Как уже указывалось выше, согласно выводам Гельмгольца, вихревое кольцо в безграничной „идеальной" жидкости ни в коем случае не может претерпевать разрыва. Но в случае дымового кольца в воздухе подобного рода разрыв возможен и притом так, что данный вихрь будет продолжать существование, сохраняя свои наиболее существенные черты. Можно, например, разрезать дымовое кольцо на две части и отдельно наблюдать две образовавшиеся вихревые нити при условии, что они своими концами будут опираться на поверхность какого-либо твердого тела, скользя по этой поверхности. И затем возможно вновь срастить соответствующие концы этих незамкнутых вихрей и восстановить замкнутое вихревое кольцо.

Это легко показать непосредственно на опыте, если на пути перемещающегося дымового кольца расположить, например, лист бумаги в направлении поступательного движения данного кольца так, чтобы острый край бумаги приходился как-раз по диаметру кругового контура кольца. Тогда дымовое кольцо разрежется листом бумаги пополам. Четыре конца образовавшихся двух вихревых нитей будут скользить по поверхности бумаги. Сойдя с нее, они срастятся и снова образуется прежнее вихревое кольцо.

В описываемом опыте возможно, однако, придать такую форму приспособлению, разрезающему кольцо, что в то время, как четыре конца обеих половин дымового кольца скользят по искривленным поверхностям этого приспособления, два конца каждой половины будут попарно сближаться между собой и вместе с тем несколько отодвигаться от концов другой половины. При таких условиях по миновании указанного приспособления, разрезавшего дымовое кольцо пополам, и после схождения половин кольца с него оказывается, что концы каждой из этих половин вынуждены теперь попарно соединяться друг с другом, вследствие чего образуются уже *два* отдельных дымовых кольца соответственно меньших размеров.

При постановке подобного опыта было испробовано несколько вариантов приспособления, которое могло бы, произведя разрезание дымового кольца пополам, обусловить указанные смещения концов вихревых нитей. На рис. 82 изображен один из наиболее подходящих вариантов режущего приспособления (*a*) и показан угол расхождения (*b*) двух изогнутых поверхностей для ряда горизонтальных сечений (*1*—*5*) этого приспособления. Оно в основном состоит из двух листков бумаги,

склеенных вдоль криволинейного края (см. слева) и так изогнутых, что угол их расхождения оказывается не одинаковым в различных горизонтальных сечениях. Наименьший угол соответствует среднему сечению (*3*). По краям, вверху и внизу, угол сделан значительно большим (*1* и *5*). В промежуточных сечениях (*2* и *4*) угол имеет некоторую среднюю величину. Всё режущее приспособление, высотой около 100 мм, поддерживается вертикальной стойкой.

Опыт удавался лучше всего с очень медленным дымовым кольцом, диаметром около 60 мм, которое может, между прочим, генерироваться при помощи трубки, имеющей конструкцию, показанную на рис. 65. Очень полезно было применение манжеты, надетой на конец трубки (рис. 66).

Рис. 83 представляет собой (в плане) схему эксперимента с разрезанием одного дымового кольца пополам и образованием из этих половин двух меньших колец. Здесь S есть разрезающее приспособление. Неразделенное дымовое кольцо A изображено пунктиром. Образовавшиеся

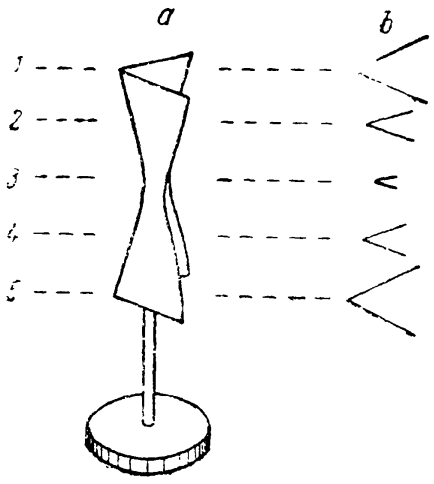


Рис. 82.

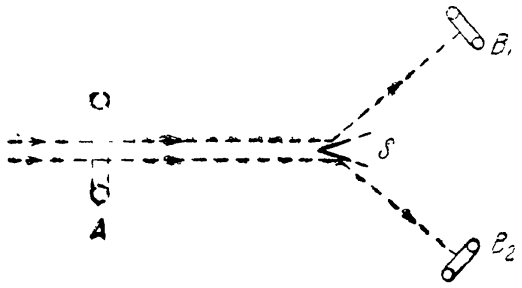


Рис. 83.

меньшие кольца B_1 и B_2 отклоняются в стороны от направления поступательного движения большего кольца A. Пунктиром же показаны пути движения всех трех колец. При спокойном состоянии воздуха и при надлежащем подборе других условий опыта он легко повторялся и допускал отчетливое наблюдение получаемого результата.

То, что было наблюдено в описанном опыте (рис. 83), само по себе, конечно, ни в коей мере не соответствует реальным условиям преобразования магнитных линий и, казалось бы, имеет мало общего с преобразованиями магнитного потока. Однако этот опыт всё же представляет известный интерес в теоретическом отношении. Во-первых, он до некоторой степени проливает свет на возможные детали того процесса быстрого перераспределения концов вихревых нитей, о котором мы говорили выше, рассматривая момент контакта двух противоположно направленных участков одной и той же или двух разных вихревых нитей. Во-вторых, опыт этот еще раз подтверждает легкость, с которою вихревые кольца вообще могут подвергаться разного рода деформированиям. В-третьих, он весьма наглядно доказывает большое стремление всякой вихревой нити образовывать замкнутый контур путем сращивания ее концов в случае их обнажения. Концы вихревых нитей стремятся, так сказать, присосаться один к другому, когда вращательное движение в них оказывается согласованным, а это всегда имеет место в случае двух концов одной и той же вихревой нити. Наконец, в-четвертых, опыт

позволяет несколько углубиться в физический смысл важного положения, к которому Гельмгольц пришел чисто математическим путем и которое гласит о принципиальной замкнутости контура вихревой нити в *безграничной* „идеальной" жидкости, т. е. в условиях, когда отсутствуют какие-либо границы *непрерывной* жидкой среды, на которых могли бы заканчиваться концы вихря. *Действительно, при таких условиях полностью устраняется какая бы то ни было возможность самопроизвольного обнажения концов вихря. Тем самым обеспечивается совершенная непрерывность контура вихревой нити.*

3. Итак, в ряде вышеописанных опытов мы встретились с аналогиями преобразований магнитного потока. Были констатированы сращивания и разделения замкнутых вихревых нитей в воздухе. И всё это проявлялось не в виде каких-либо слабых намеков, но с большой отчетливостью и в форме, не оставляющей никаких сомнений в действительном характере наблюдаемого процесса. Может возникнуть один только вопрос: были ли эти преобразования непрерывны? Иными словами, насколько далеко и глубоко идет рассмотренная аналогия тех преобразований магнитных линий (трубок магнитной индукции), которые составляют, повидимому, сущность всякого электромагнитного процесса? Ведь принимая во внимание принцип непрерывности магнитного потока, мы должны считать всевозможные преобразования магнитного потока *непрерывными.*

Есть полное основание утверждать, что в условиях, когда вихри всё время пребывали в воздухе и не встречали на своем пути каких-либо твердых тел, на поверхность которых могли бы опираться концы вихревой нити, преобразования дымовых колец, наблюдавшиеся в опытах, были действительно непрерывными. Они были непрерывными в том смысле, как это было разъяснено в § 27, посвященном непрерывным преобразованиям замкнутых пространств.

Таким образом, в преобразованиях дымовых колец можно усматривать полную сходственность с преобразованиями магнитных линий, которые с точки зрения Максвелла следует трактовать именно в качестве замкнутых вихревых нитей в безграничном эфире, непрерывно заполняющем всё мировое пространство.

Закончим настоящий параграф словами Ньютона, которые были уже цитированы ранее в главе III (см. § 22):

„... не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда и проста и всегда сама с собой согласна".

§ 30. Выводы по вопросу о природе магнитного потока, вытекающие из опытов с дымовыми кольцами

Результаты опытов, описанных в предыдущем параграфе, в совокупности со всем, что известно о свойствах магнитного потока, позволяют сделать некоторые дополнительные указания по вопросу о природе процессов, происходящих в магнитном поле, и подвести итоги ряда соображений, которые до сих пор носили в известной мере предположительный характер.

Опыты с преобразованием дымовых колец в воздухе имели целью обнаружить хотя бы намеки на нечто, соответствующее процессам, наблюдаемым в разного рода магнитных и электромагнитных явлениях. Однако до известной степени неожиданно результаты этих опытов оказались столь отчетливыми и определенными, что в них, быть может, позволительно видеть *нечто большее, чем простое формальное сходство с преобразованиями магнитного потока.*

Дело в том, что если магнитный поток действительно должен рассматриваться в качестве подлинной физической реальности, — а в этом не может быть никаких сомнений, — то мыслимы, повидимому, только две возможности в отношении каких-либо предположений о природе магнитного потока, т. е. о специфической форме пространственных перемещений материи, которые присущи, конечно, магнитному потоку, как и всякой иной физической реальности (см. § 3 Главы I). Либо магнитный поток, принципиально обладающий свойством непрерывности, аналогичен потоку некоторой жидкости и тогда трубки магнитной индукции (магнитные линии) должны быть во всем подобны струям несжимаемой жидкости, не обладающей вязкостью. Либо справедливо предположение Максвелла о том, что элементарные составляющие магнитного потока представляют собой вихревые нити в жидкости, лишенной вязкости (в эфире). Что-либо третье трудно себе представить.

Первое предположение само собой отпадает, как не выдерживающее никакой критики. Грубо элементарной была бы попытка усматривать в стремлении магнитного полюса перемещаться вдоль магнитных линий — результат увлечения этого полюса струями поступательно двигающегося эфира. Если бы всё было так просто, то несомненно подобное же увлечение наблюдалось бы и в ряде других случаев, когда в магнитном поле оказываются расположенными сколь угодно малые тела, состоящие, например, из парамагнитного вещества, т. е. из вещества, которое вообще подвержено весьма заметному влиянию со стороны магнитного поля. Никакое микрофизическое явление не говорит в пользу предположения о течении какой-либо особой жидкости вдоль магнитных линий. Наконец, то обстоятельство, что северный магнитный полюс стремится двигаться в одном направлении, а южный полюс — в прямо противоположном направлении, заставляет искать какого-то другого объяснения наблюдаемых в магнитном поле движений.

Что же касается второго предположения, то здесь дело обстоит совершенно иначе. Мы уже имели случай упоминать об открытом Фарадеем явлении магнитного вращения плоскости поляризации света (см. § 5 Главы I). Как известно, В. Томсон (Кельвин) и Максвелл пришли к заключению, что это явление свидетельствует о наличии в магнитном поле некоторых вращательных движений. В „Трактате об электричестве и магнитизме“ Максвелл, анализируя магнитное вращение плоскости поляризации света, специально останавливается на рассмотрении данного явления с точки зрения, признающей, что в магнитном поле мы действительно имеем дело именно с вихревой формой движения материи.[1]

Кроме того, в ряде своих не совсем доведенных до логического конца работ, посвященных механизму электромагнитной индукции, Максвелл[2] по существу рассматривал действие некоторых особых вихревых образований в лишенной вязкости среде на проводник, двигающийся поперек этих вихревых образований, и пришел к результатам, которые следует признать в общем подтверждающими мысль о вихревой природе магнитных линий. Наконец, и что особенно важно, у магнитных линий, повидимому, нет таких свойств, которые выходили бы за пределы возможных свойств вихревых нитей в „идеальной“ жидкости, теоретически изученных Гельмгольцем. Целый ряд соображений подобного рода является очень веским доводом в пользу предположения, что в магнит-

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, §§ 822—831; „On the Hypotesis of Molecular Vortices“.

[2] Maxwell. Phil. Mag., 1861, vol. XXI, p. 161, and 1862, vol. XXIII, p. 12.

ном поле мы встречаемся именно с проявлениями вихревых движений эфира.

Однако, как мы отмечали уже раньше (§ 29), Гельмгольц в своих исследованиях, посвященных вихревому движению, не затрагивал вопроса о мыслимых преобразованиях вихревых колец путем их сращивания или деления. В этом отношении оставался некоторый пробел, который до известной степени и был восполнен опытами, описанными в предыдущем параграфе. Эти опыты с дымовыми кольцами свидетельствуют о полном сходстве всех стадий преобразования замкнутых вихревых нитей в воздухе с соответствующими стадиями преобразований магнитного потока. Сращивание и деление дымовых колец протекает тем же путем, как, надо полагать, происходят сращивания и слияния, а также разделения магнитных линий. В случае вихревых нитей мы встречаемся во всех подробностях с тем же, что необходимо приписать магнитным линиям, подвергающимся процессу преобразования.

Результаты экспериментирования с дымовыми кольцами необходимо рассматривать в качестве еще одного, и притом не достававшего, звена в цепи доказательств большого правдоподобия идеи о вихревой природе магнитного потока.

Итак, насколько позволяет судить вся совокупность разнообразных опытных данных, такое представление о характере процессов, совершающихся в магнитном поле, вполне соответствует действительности.

§ 31. Основная стадия в процессах сращивания и разделения магнитных линий

а. Приведенные в § 26 примеры преобразований магнитного потока дали нам повод высказать некоторые суждения об особенностях этих преобразований и показать, что отмеченное еще Фарадеем сращивание и слияние магнитных линий в один общий контур есть процесс, весьма часто встречающийся в области явлений магнитных или электромагнитных. Не менее часто наблюдается и обратный процесс разделения одной магнитной линии на два самостоятельных контура. Только иногда, повидимому, может итти речь о том, что преобразование магнитного потока ограничивается простым деформированием магнитных линий.

Рассмотрим теперь подробнее главнейшую стадию таких преобразований магнитного потока, которые сопровождаются изменением структуры контуров магнитных линий, т. е. их сращиванием или разделением. В отличие от простого деформирования магнитных линий будем называть подобного рода преобразования *структурными*.

При внимательном обследовании вопроса о том, как именно могут осуществляться сращивания и разделения магнитных линий, оказывается, что эти процессы, хотя мы и воспринимаем их как прямо противоположные, в действительности внутренне едины. В них есть общий основной момент. Указанные процессы, по своим результатам обратные друг другу, имеют то общее, что и сращивание и разделение магнитных линий предваряются одним и тем же моментом контакта между какими-либо участками магнитных линий, направленными в противоположные стороны. Такой контакт есть *основная стадия* всякого структурного преобразования магнитных линий.

Приходящие в контакт участки могут принадлежать ранее совершенно обособленным контурам магнитных линий или же могут входить в состав

одной и той же магнитной линии. В первом случае в результате структурного преобразования получится сращивание и слияние двух независимых контуров магнитных линий в один общий контур. Во втором случае произойдет разделение одной магнитной линии на два вполне обособленных контура.

И при описании ряда рассмотренных выше случаев структурных преобразований магнитного потока (§ 26), и при описании всех тех аналогий непрерывного преобразования магнитного потока, с которыми мы уже познакомились в §§ 28 и 29, мы неоднократно подчеркивали, что в ходе этих преобразований имеют существенное значение процессы, происходящие в непосредственной близости к особенной точке O или, можно даже сказать, в самой точке O (рис. 26—31, 34, 40; рис. 72, 75, 79 и 80). Во всех указанных случаях около точки O оказывались сближенными и рядом расположенными те элементы объема, в которых происходят физические процессы противоположного направления. Теснейший же контакт в точке O или наложение в этой точке двух физических процессов, направленных обратно друг другу, неминуемо и безусловно должны иметь следствием взаимное ослабление их в точке O и в непосредственной близости к этой особенной точке O. Здесь всегда в таких случаях происходит нечто, подобное интерференции света, когда при совмещении двух очень тонких пучков света, в которых процессы волнового характера находятся в прямо противоположных фазах, получается не усиление света, а ослабление его и даже полное исчезновение, если интенсивности интерферирующих пучков света были тождественны. В зависимости от природы рассматриваемых явлений самый механизм подобного ослабления результирующего физического процесса в точке O или, скажем, механизм интерференции (в общем смысле этого слова) может быть весьма различен. Всегда, однако, при этом необходимо иметь в виду следующее. Совершенно неправдоподобно предположение, будто бы существует хоть какое-либо физическое явление, которое не включало бы в себе в той или иной форме пространственных перемещений материи, соответствующих специфике данного явления. Подобных физических явлений в природе нет. Следовательно, противоположно направленные физические процессы должны, конечно, различаться между собою направлением указанных пространственных перемещений материи. В связи с этим необходимо притти к заключению, что при контакте в особенной точке O, т. е. во время протекания основной стадии структурного преобразования магнитных линий или иных направленных физических реальностей, происходит наложение пространственных перемещений материи, обладающих равными и противоположными скоростями. Иначе затруднительно представить себе не формальную сторону, а самую сущность всякого процесса интерференции. Само собой разумеется, что при этом, как и в случае интерференции света, происходит объемное перераспределение энергии, связанной с рассматриваемым физическим процессом, так что никакого нарушения закона сохранения энергии не может быть. В результате устанавливается некоторое новое состояние преобразовавшейся системы физических реальностей. В соответствии с предоставляющимися возможностями движение продолжается в новой комбинации элементарных пространственных перемещений материи, с сохранением характерных особенностей физического процесса в целом. Такова общая схема всех структурных преобразований, о которых мы говорили до сих пор.

Сделаем еще несколько замечаний по поводу неустойчивого состояния преобразующейся системы в момент контакта в точке O. В некоторых

случаях это наблюдается весьма отчетливо. Ради иллюстрации той неустойчивости, о которой идет речь, остановимся на примере преобразования двух капель жидкости в одну каплю большего размера. Хотя данный случай и не относится непосредственно к тому разряду непрерывных преобразований, которым мы особенно интересуемся, но он очень характерен в смысле неустойчивости. В момент контакта двух капель жидкости вся система приходит в состояние крайне неустойчивого равновесия и не может длительно пребывать в нем. Капли стремятся быстро слиться в одну общую каплю бо́льших размеров. То же наблюдается и при обратном процессе деления большей капли на две меньшие. Растягивание капли сопровождается образованием перехвата или шейки (см. рис. 49), быстро сужающейся и в пределе переходящей в точку контакта выделившихся двух частей первоначальной капли (рис. 50). Затем обычно следует нарушение контакта и разрыв. Образуются две меньшие капли. В момент контакта система капель вообще всегда находится в состоянии неустойчивого равновесия. Если исходить от момента контакта, то можно представить себе и дальнейшее слияние капель в одну и дальнейшее разделение на две капли. Всё зависит от направления процесса преобразования.

Подобное же состояние весьма неустойчивого равновесия в момент контакта наблюдалось и во время опытов со структурным преобразованием дымовых колец, когда мы имели дело со случаем, вполне аналогичным непрерывному преобразованию магнитных линий. Самый контакт происходит столь быстро, что нет никакой возможности непосредственно глазом проследить всё, что при этом совершается. Такое быстрое протекание стадии контакта в свое время уже отмечалось при описании опытов с дымовыми кольцами. В этой стадии вихревые кольца не могли оставаться сколько-нибудь длительно. Это особенно ясно наблюдалось, когда вибрировало вихревое кольцо, получившееся в результате слияния двух меньших колец (рис. 77). Сильно вытягивавшееся кольцо, повидимому, иногда образовывало контакт в месте перехвата, т. е. там, где могли вступить в соприкосновение противоположно направленные участки вихревой нити. И в зависимости от чисто случайных движений воздуха немедленно же после контакта либо вновь восстанавливалось большее кольцо, либо происходило разделение на два малых дымовых кольца. Никогда при этом не наблюдалось, чтобы вихревые кольца в течение заметного промежутка времени двигались поступательно в условиях сохранения контакта.

Только в некоторых особых случаях, например при преобразовании цепи электрического тока (рис. 58—61), стадия контакта в одной точке может принудительно сохраняться сколь угодно долго. Но ведь в данном случае преобразования физического процесса (электрического тока) полностью подчиняются соответствующим деформированиям проводящего контура.

6. После этих предварительных замечаний общего характера остановим наше внимание на схематической картине *силовых линий* магнитного поля двух сближенных магнитов $N_1 S_1$ и $N_2 S_2$ (рис. 84). Одна из этих силовых линий, отмеченная буквами a, особо выделена, будучи проложенной пунктиром. Как известно, под силовыми линиями в случае магнитного поля разумеют линии вектора магнитной силы H. В среде однородной и изотропной, в данном случае — в воздухе, та же картина иллюстрирует и распределение линий вектора магнитной индукции B или, точнее сказать, магнитных линий, поскольку мы будет говорить именно о физически существующих нитеобразных составляющих магнитного потока. В воздухе

обе эти системы линий, характеризующие поле с различных точек зрения, в основном имеют и тот же вид. Вследствие этого нередко допускают ошибку, говоря о силовых линиях, когда надо иметь в виду магнитные линии. Часто забывают о принципиальном различии между понятиями силовой линии и магнитной линии. Термин „силовая линия" имеет чисто геометрическое значение. Вообще говоря, мы можем строить в магнитном поле бесконечно большое число силовых линий. Какие-либо ограничения в этом отношении не имеют определенного физического смысла и бесполезны при изучении реальных процессов, происходящих в магнитном поле. Термином же „магнитная линия" мы обозначаем обычно единичные трубки магнитной индукции или, в особых случаях, элементарные составляющие магнитного потока, предполагая при этом, конечно, что из контекста ясно, о чем именно идет речь. В том и другом случае количество магнитных линий должно строго соответствовать процессу, действительно происходящему в магнитном поле. Каждая элементарная магнитная линия представляет собою совершенно определенную физическую реальность.

Кроме указанного различия двух рассматриваемых систем линий, внешне весьма схожих, есть между ними еще одно весьма существенное различие. Дело в том, что через особенную точку O (рис. 84) проходит силовая линия a, обе ветви которой пересекаются в этой точке. Путем точного расчета можно показать, что в особенной точке O всегда будут соблюдаться следующие соотношения:

$$H=0,$$

$$B=0.$$

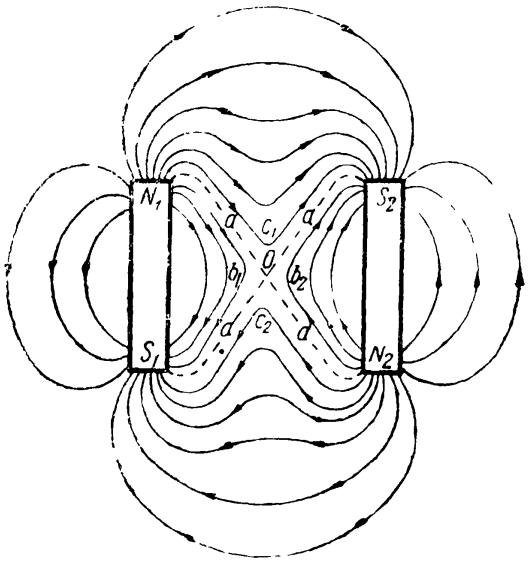


Рис. 84.

Это *весьма важное обстоятельство* объясняется тем, что у точки O сближаются и интерферируют физические процессы взаимно противоположного направления. Как ясно видно на рис. 84, участки линий b_1 и b_2, c_1 и c_2 вблизи точки O попарно имеют обратные направления.

Силовую линию a мы всегда можем мыслить обеими своими ветвями проходящей через точку O. Рассуждая чисто формально, мы, казалось бы, должны полагать, что через ту же точку O может проходить и некоторая магнитная линия, геометрически совпадающая с силовой линией a. Однако с точки зрения существа физического процесса, происходящего в магнитном поле, мы в таком случае вступаем в конфликт с принципом непрерывности магнитного потока, если допускаем, что какая-либо магнитная линия проходит через точку O, в которой

$$B=0.$$

Ведь это значило бы, что в точке O магнитная линия претерпевает разрыв. Но это физически невозможно. На всем протяжении магнитной линии в любой точке магнитная индукция B должна иметь какое бы то ни было конечное значение, хотя бы и очень малое. Следовательно, необходимо признать, что никакая реально существующая магнитная

линия (элементарная трубка магнитной индукции) не может проходить через точку O, в которой пересекаются две ветви силовой линии a.

В связи со всем сказанным протекание основной стадии всякого структурного преобразования магнитного потока, т. е. стадии контакта в особенной точке O двух противоположно направленных участков различных магнитных линий или одной и той же магнитной линии, можно представить себе в следующем виде.

В случае уменьшения расстояния между магнитами $N_1 S_1$ и $N_2 S_2$ (рис. 84) магнитные линии, подобные линиям b_1 и b_2 и представлявшие собой обособленные контуры, беспредельно приближаются к контуру силовой линии a и вступают в контакт в точке O. В этот момент их интерференция в точке O сопровождается сращиванием двух контуров данных магнитных линий и слиянием в один общий контур, подобный магнитной линии $c_1 c_2$, проходящей в рассматриваемом случае сквозь оба магнита. В течение ничтожно малого промежутка времени протекания основной стадии преобразования начальные магнитные линии успевают пройти через контур силовой линии a, на момент с ним совпадая, и перекидываются на другую сторону этого контура, образуя дальше одну сплошную магнитную линию типа $c_1 c_2$.

В случае же увеличения расстояния между магнитами $N_1 S_1$ и $N_2 S_2$ под влиянием бокового распора в системе магнитных линий сближаются участки c_1 и c_2, принадлежащие одной и той же магнитной линии, до контакта в точке O, причем эта магнитная линия стремится расположиться вдоль контура силовой линии a и перебрасывается затем на другую сторону этого контура одновременно с преобразованием у точки O в две обособленные магнитные линии типа b_1 и b_2.

В обоих случаях структурного преобразования магнитных линий, т. е. при их сращивании и при их разделении, основная стадия происходящего явления по существу одна и та же. Это есть контакт в точке O, сопутствуемый интерференцией двух физических процессов, направленных в разные стороны. И во всё время протекания описываемой основной стадии концы магнитных линий не обнажаются, принцип непрерывности магнитного потока не нарушается и вместе с тем в особенной точке O, вообще говоря, имеем:

$$B = 0.$$

Таким образом, прохождение магнитных линий через контур силовой линии a и частичное совпадение с ним всегда сопровождаются их структурным преобразованием у точки O. Только во время этого движения магнитных линий различные точки силовой линии a могут совмещаться с ними. В статическом же состоянии системы магнитных линий такое совмещение невозможно.

в. Рассматривая основную стадию процесса сращивания и разделения магнитных линий, мы не делали никаких оговорок относительно масштабов этого процесса. Но, конечно, речь шла о структурном преобразовании реально существующих *элементарных* трубок магнитной индукции (элементарных магнитных линий), поперечные размеры которых, вообще говоря, необходимо считать очень малыми.

Совершенно несомненно, что основная стадия структурного преобразования магнитного потока протекает у особенной точки O как некоторое явление *микрофизического порядка*. Всё это по своим масштабам сравнимо с тем, что совершается в области внутриатомных явлений, где роль элементарных магнитных потоков и их преобразований, надо полагать, весьма велика. Однако до сих пор последнее обстоятельство, к сожале-

нию, еще не привлекло к себе достаточного внимания со стороны изучающих внутриатомные процессы.

В связи со всем сказанным выше возникает еще один вопрос, относящийся к области микрофизики. Дело в следующем. Если в статическом состоянии никакая магнитная линия не может совмещаться с силовой линией a (рис. 84), то отсюда вытекает кажущееся разногласие такого рода. Вне особенной точки O в различных иных точках кривой a магнитная сила H может иметь любое конечное значение. Казалось бы, что в этих точках должна иметь конечное значение и величина магнитной индукции B. Между тем, отсутствие магнитных линий, совмещающихся с кривой a, как бы противоречит допущению конечного значения магнитной индукции B в рассматриваемых точках. Но суть дела в том, что по своему физическому смыслу величина B представляет собою не что иное, как плотность распределения магнитных линий в пространстве. Следовательно, магнитной индукцией мы называем некоторую усредненную величину, которую мы, лишь в таком понимании ее, и можем обычно относить к какой-либо точке пространства. Если же под B разуметь не усредненную величину, а характеристику магнитного процесса в строго определенной точке, то мы можем получать весьма различную величину магнитной индукции B, переходя от точки к точке поперек направления магнитных линий. Так должно быть по причине дискретности физически существующих элементарных трубок магнитной индукции (элементарных магнитных линий). В данном случае всё происходит совершенно аналогично объемной плотности электричества. Это также есть некоторая усредненная величина, численно равная количеству дискретных электрических зарядов, соответствующих заряду электрона и приходящихся на единицу объема. В микрофизических же масштабах, переходя от точки к точке, мы можем иметь весьма различную величину плотности электричества, колеблющуюся в широких пределах. Всё это относится к области условности математической трактовки физических явлений, когда мы иногда отвлекаемся от дискретности реальных элементарных объектов и оперируем с некоторыми усредненными величинами.

г. Схема с двумя сближаемыми и раздвигаемыми магнитами (рис. 84) строго соответствует тому, что имел в виду Фарадей, когда формулировал свои положения, касающиеся преобразований магнитного потока (§ 25). Эта схема позволила нам проанализировать основную стадию структурного преобразования магнитных линий. Результаты, к которым мы пришли, имеют совершенно общий характер. Представляется в высокой степени вероятным, что во всех без исключения случаях структурных преобразований магнитного потока рассмотренная основная стадия составляет сущность происходящего процесса. Иногда кажутся не вполне отчетливыми общие условия и место протекания основной стадии преобразований. Но всегда при внимательном рассмотрении это можно выяснить. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что до сих пор мы сосредоточивали внимание лишь на картине структурных преобразований магнитного потока, происходящих в какой-либо одной плоскости. В действительности же этот процесс может протекать и нередко протекает в объеме трехмерного пространства, не укладываясь всеми своими частями в строго определенную плоскость.

Рассмотрим в виде примера случай двух взаимно перпендикулярных систем магнитных линий, которые расположены в различных плоскостях и постепенно сближаются. На рис. 85 сплошными стрелками изображены магнитные линии, лежащие, например, в плоскости чертежа, а пунктирными стрелками представлены перпендикулярные им магнитные линии,

лежащие в некоторой иной плоскости, параллельной первой. При рассмотрении данного случая, как и в ряде других случаев преобразования магнитного потока, необходимо еще принять во внимание сопутствующее деформирование сближаемых частей магнитных линий. Раньше мы останавливались на вопросе о боковом распоре в системе магнитных линий, одинаково направленных (§ 23 Главы III). В связи с наличием такого рода сил ближайшие участки двух различных магнитных линий, расположенных под некоторым углом одна к другой и одинаково направленных по отношению к вершине этого угла, стремятся повернуться так, чтобы угол между ними стал еще больше. Угол же между противоположно направленными участками становится при этом меньше. В результате, взаимно перпендикулярные магнитные линии будут соответственным образом искривляться в местах сближения, и здесь образуются очень малые участки (микрофизического масштаба), в которых оказываются противоположно направленные магнитные процессы. Это и показано грубо

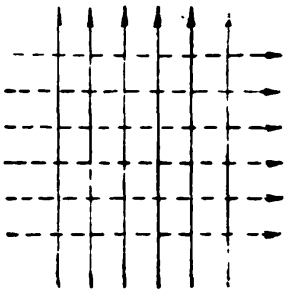


Рис. 85.

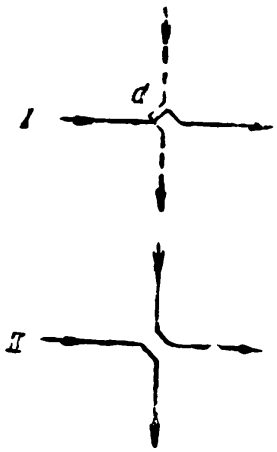


Рис. 86.

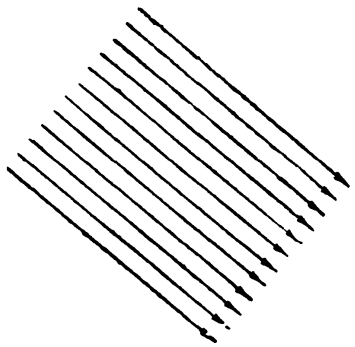


Рис. 87.

схематически на рис. 86 (позиция *I*) для случая двух выделенных взаимно перпендикулярных магнитных линий. Вследствие интерференции магнитных процессов в области *d* при сближении их до контакта структурное преобразование рассматриваемых двух магнитных линий приведет к пересоединению их частей и к появлению двух же магнитных линий, но иной формы (рис. 86, позиция *II*). Подобного рода сращивания произойдут во всей сложной системе магнитных линий, представленной на рис. 85, и в конце концов, после соответствующего выпрямления получившихся искривлений благодаря продольному тяжению магнитных линий, мы придем к картине, изображенной на рис. 87. Итак, сращивание и слияние двух взаимно перпендикулярных групп магнитных линий приводят, следовательно, к одной результирующей системе магнитных линий, наклоненных под некоторым углом по отношению к исходным магнитным линиям.

Мы не будем останавливаться на других возможных частных случаях сращивания и слияния магнитных линий, а также на различных мыслимых случаях их разделения. Всегда это должно осуществляться путем некоторого деформирования и местного искривления магнитных линий, в результате чего могут приходить в контакт их противоположно направленные участки. Во всех этих случаях в той или иной форме играет существенную роль рассмотренная основная стадия структурных преобразований магнитного потока.

§ 32. Преобразования магнитного потока в процессе электромагнитной индукции тока

Фарадей, изучая открытое им явление электромагнитной индукции тока и анализируя обстановку опыта, пришел к заключению, что в данном случае особо существенную роль играет непосредственное взаимодействие проводника с системой магнитных линий внешнего поля, поперек которого он движется. Этот процесс Фарадей описывал как *„пересечение“* физически существующих нитеобразных составляющих магнитного потока перемещающимся проводником. После всего того, что было сказано вообще о преобразованиях магнитного потока, представляется возможным вскрыть некоторые подробности того, как протекает явление электромагнитной индукции тока, и выяснить, в каком смысле надо понимать „пересечение“ магнитных линий проводником.

Оставляем пока без рассмотрения начальную стадию возникновения электрического тока в проводнике. Предположим, что некоторый достаточно сильный ток, индуктируемый в замкнутой цепи, уже течет в ней. На схематическом рис. 88 прямолинейный участок проводника, входящий в состав этой цепи, изображен расположенным нормально к плоскости чертежа. Условимся, что ток в нем течет в направлении от нас за плоскость чертежа (показано крестиком). Допустим затем, что данный участок проводника перемещается слева направо поперек внешнего магнитного потока, исходящего из полюса N и входящего в полюс S. Само по себе наличие тока в проводнике обусловливает соответствующее искривление магнитных линий в рассматриваемом поле. Об этом мы уже говорили раньше (§ 26, рис. 39 и 40). Для принятого взаимного расположения проводника с током и полюсов N и S на рис. 88 пунктиром изображена силовая линия a. Обе ветви ее пересекаются в особенной точке O, в которой и магнитная сила H и магнитная индукция B равны нулю. Ради упрощения дальнейших рассуждений из всего внешнего магнитного потока выделяем всего несколько магнитных линий, в данном случае восемь, особо пронумерованных. На этих магнитных линиях и сосредоточим теперь наше внимание.

Как показано на рис. 88, магнитная линия *1* уже „пересечена“ проводником, движущимся слева направо. Эта магнитная линия помещается вся полностью влево от проводника. Магнитные же линии *2—8*, деформированные в большей или меньшей степени, обходят проводник справа и еще не „пересечены“. При этом магнитная линия *2* сильно искривлена и находится в состоянии, непосредственно предшествующем полному сближению ее противоположно направленных участков b_1 и b_2, расположенных по обе стороны от точки O. При некотором дальнейшем продвижении проводника вправо произойдет контакт участков b_1 и b_2 в точке O и переключение частей данной магнитной линии *2*, т. е. она претерпит основную стадию своего структурного преобразования. В результате получится разделение магнитной линии *2*. Основная ее часть, связанная с полюсами N и S, полностью располагается теперь с левой стороны от проводника, т. е. она уже „пересечена“ проводником (рис. 89). Отделившееся же от магнитной линии *2* и совершенно обособившееся от нее магнитное звено оказывается нанизанным на проводник, в дополнение к изображенному здесь первому звену, которое можем считать ранее отпочковавшимся таким же образом от магнитной линии *1*. В связи

нение к изображенному здесь первому звену, которое можем считать
ранее отпочковавшимся таким же образом от магнитной линии 1. В связи

положение, показанное на рис. 89. Здесь уже магнитная линия *3* в свою очередь принимает сильно искривленную форму, предшествующую основной стадии преобразования, которому должна подвергнуться и эта магнитная линия при продолжении движения проводника вправо и при контакте ее участков c_1 и c_2 в точке *O*. На рис. 90 показано общее расположение магнитных линий в рассматриваемой системе после окончания структурного преобразования магнитной линии *3*, когда от нее отпочковалось третье магнитное звено, опять-таки нанизавшееся на проводник, а основная часть этой магнитной линии *3* уже „пересекла" таким образом проводник и перекинулась справа от проводника влево от него. Обходят проводник справа еще магнитные линии *4—8*.

Преобразования, подобные только что описанным, должны претерпеть все магнитные линии основного внешнего потока, „пересекаемые" движущимся слева направо проводником, по которому течет индуктируемый ток. От каждой из них должно отпочковываться по одному

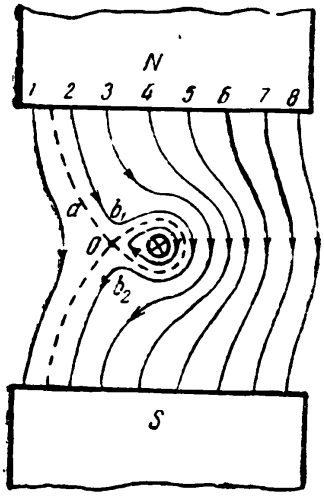


Рис. 88.

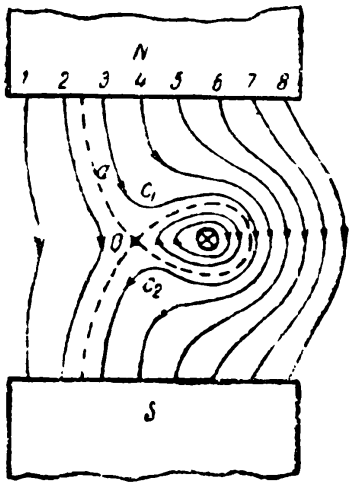


Рис. 89.

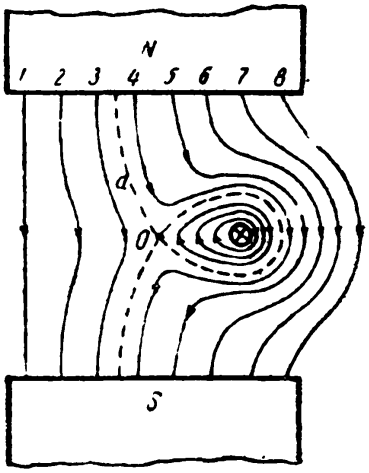


Рис. 90.

магнитному звену, нанизывающемуся на контур рассматриваемой замкнутой цепи. Иначе представить себе этот процесс невозможно, если придерживаться фарадее-максвелловских взглядов на общий характер и на природу магнитных явлений. Это есть *совершенно необходимое следствие* из всего, что было сказано по поводу свойств магнитного потока как физической реальности. Вместе с тем можно полагать, что во всех без исключения случаях индуктирования тока необходимо так или иначе считаться со схемой, которая была иллюстрирована рис. 88—90. Всегда, когда в процессе электромагнитной индукции проводник, входящий в состав замкнутой цепи и несущий достаточно сильный ток, движется поперек внешнего магнитного потока, от этого последнего будут отпочковываться магнитные звенья, нанизывающиеся на контур цепи. Образующиеся магнитные звенья присоединяются к потоку самоиндукции рассматриваемой замкнутой цепи. При этом, конечно, совершенно безразлично, движется ли проводник, или он неподвижен, а движется внешний магнитный поток. Важно лишь наличие их относительного перемещения.

При отпочковывании магнитных звеньев магнитные линии внешнего потока оказываются перебросившимися с одной стороны перемещаемого проводника на другую. Всё это мы обычно и описываем словами: „пересечение магнитных линий проводником".

Мысль об отпочковании магнитных звеньев от основного магнитного потока в процессе электромагнитной индукции тока была высказана еще в 1899 г. Флемингом.[1] Однако он ограничился лишь построением некоторой простейшей схемы для одного частного случая и не дал достаточного обоснования этой плодотворной идеи. Флеминг не обратил внимания на ряд далеко идущих обобщений, о которых речь будет итти дальше, в Главе VI.

Скажем теперь несколько слов о самом возникновении индуктированного тока. Как было указано выше, это мы оставили вначале без особого рассмотрения. Мы стремились сосредоточить внимание на наиболее существенных сторонах процесса электромагнитной индукции.

Не подлежит какому-либо сомнению, что в случае совершенного проводника, не обладающего электрическим сопротивлением, т. е. в случае так называемого сверхпроводника, процесс электромагнитной индукции с самого же начала должен сопровождаться деформированием магнитных линий внешнего потока и отпочкованием магнитных звеньев, нанизывающихся на проводник, как показано на рис. 89 и 90. Это необходимо вытекает из полной непроницаемости сверхпроводников для внешнего магнитного поля. Всё, касающееся свойств сверхпроводников в отношении магнитного потока, составит предмет специального рассмотрения в §§ 50—53 Главы VI и потому здесь мы не будем говорить об этом подробнее.

Что касается обычных проводников, электрическое сопротивление которых не равно нулю, то в начальной стадии индуктирования достаточно сильного тока, а также в случае очень слабого индуктируемого тока или вообще при разомкнутой цепи магнитные линии будут, конечно, проникать сквозь вещество проводника, и ось его будет пересекать, в полном смысле слова, оси элементарных трубок магнитной индукции. Представляется весьма правдоподобным, что при этом в проводнике будет индуктироваться электродвижущая сила по схеме, проанализированной Максвеллом в его не совсем законченных работах, которые были упомянуты в § 30. Именно, он показал, что электричество в проводнике, перемещающемся поперек магнитных вихревых нитей, должно стремиться двигаться вдоль этого проводника. В данном случае всё будет происходить аналогично тому, с чем мы встречаемся в области гидродинамики, когда сосуществуют вихревые движения в жидкой среде и поступательное движение этой же среды поперек вихрей (теорема Магнуса). Если электрическая цепь замкнута, то указанная электродвижущая сила вызовет движение элементарных электрических зарядов вдоль проводника, в связи с чем немедленно же проявятся силы реакции, действующие со стороны проводника на магнитные линии внешнего поля. Наличие таких сил реакции должно обусловить соответствующее искривление магнитных линий, и дальше процесс электромагнитной индукции может развиться, как это было описано при рассмотрении рис. 88—90. В случае недостаточно сильного тока дело ограничивается некоторым искривлением магнитных линий, а отпочкование магнитных звеньев от внешнего потока, повидимому, не доходит до конца. Возникновение же потока самоиндукции очень слабого индуктированного тока имеет, надо думать, много общего с тем, что происходит в замкнутой цепи, по которой протекает ток от какого-либо гальванического элемента или от термоэлемента (см. § 64 Главы VI).

---

[1] Fleming. Electrician, 1899, Vol. XLIII, p. 764.

Нельзя, конечно, отрицать того, что в указанных соображениях по поводу начальной стадии возникновения индуктированного электрического тока в обычном проводнике есть всё же некоторые пробелы и остается ряд важных подробностей, не могущих быть выясненными до конца при современном состоянии физических знаний. Ведь нам достоверно еще не известно истинное соотношение между природой электрического поля и электрического заряда, с одной стороны, и природой магнитного потока, с другой стороны. Существование же самой тесной связи между этими двумя категориями физических реальностей с полной очевидностью вытекает из всей совокупности электромагнитных явлений (см. между прочим, §§ 59—61 Главы VI). Надо предполагать, что именно детальное изучение преобразований магнитного потока, которые имеют место при протекании таких основных электромагнитных явлений, как электромагнитная индукция и электрический ток, даст в конце концов обильный материал для суждения о сущности соотношений между магнитизмом и электричеством.

В этом смысле чрезвычайно знаменательна лаконичная запись, которую сделал в своем лабораторном дневнике Фарадей, когда он приступал к опытным исследованиям, приведшим к открытию электромагнитной индукции тока. Как известно, он написал: „Обратить магнитизм в электричество".

§ 33. Преобразования магнитного потока в двигательном электромагнитном процессе

При рассмотрении преобразований магнитного потока в процессе электромагнитной индукции тока, т. е. в генераторном электромагнитном процессе, мы не касались вопроса о том, в каких условиях чисто механического порядка совершается перемещение проводника поперек внешнего магнитного поля. На рис. 88, 89 и 90 в последовательном порядке представлена схема распределения магнитных линий в случае продвижения проводника слева направо. Внешняя механическая сила, перемещающая его, должна преодолевать какое-то сопротивление и при этом, конечно, совершается работа, эквивалентная энергии генерируемого электрического тока. При простом взгляде на рис. 88—90 становится очевидным следующее. Состояние деформирования и искривления магнитных линий, в системе которых всегда существуют продольные тяжения и боковой распор (§ 23 Главы III), должно обусловливать наличие механической силы электромагнитного происхождения, так называемой *электромагнитной силы*, действующей на проводник. Эта сила стремится двигать его так, чтобы искривленные магнитные линии могли выпрямляться. Следовательно, в рассмотренном случае электромагнитная сила была направлена справа налево, противодействуя механической силе, двигавшей проводник слева направо. Сопротивление указанной электромагнитной силы и преодолевалось внешним механическим двигателем, совершавшим работу генерирования индуктированного тока.

Предположим теперь, что внешняя механическая сила, перемещавшая проводник слева направо, перестает действовать, но в то же время ток в цепи не прекращается благодаря генерированию его, например, какой-либо посторонней динамомашиной, включенной в данную цепь. Картина распределения магнитных линий (рис. 88—90) при этом не изменится. Теперь должно проявиться наличие электромагнитной силы, которая в генераторном процессе противодействовала внешней механической

силе. Под влиянием электромагнитной силы, приложенной к проводнику, он начнет двигаться справа налево. Какие же преобразования магнитного потока будут происходить в этом случае? Не подлежит сомнению, что будут иметь место структурные преобразования магнитных линий, обратные тем, которые мы констатировали в случае генераторного процесса.

Во время движения проводника между магнитными полюсами N и S справа налево, при переходе от общего расположения, показанного на рис. 90, к расположению, изображенному на рис. 89, одно магнитное звено, охватывающее проводник и входящее в состав потока самоиндукции цепи этого проводника, придет в контакт в точке O с магнитной линией *3* и срастится с ней. В результате магнитная линия *3* окажется перекинувшейся направо от проводника. При некотором малом продвижении его справа налево магнитная линия *3* примет форму, представленную на рис. 89. При дальнейшем продвижении проводника в этом же направлении наступает очередь второго магнитного звена, нанизанного на проводник. Оно также вступит в контакт в точке Q уже со следующей магнитной линией *2* и воссоединится с ней. Магнитная линия *2* получит форму, указанную на рис. 88, т. е. окажется теперь обходящей проводник справа, причем магнитная линия *3* в то же время отчасти выпрямится и в значительной степени утратит свою сильно искривленную форму, которую она имела немедленно после окончания основной стадии ее структурного преобразования (рис. 89).

Таким образом, рис. 88, 89 и 90 иллюстрируют не только генераторный, но и двигательный электромагнитный процесс. Во втором случае необходимо лишь рассматривать эти рисунки в обратном порядке, последовательно переходя от рис. 90 к рис. 89 и, наконец, к рис. 88. Мы могли бы аналогичным путем проследить преобразование всех магнитных линий внешнего магнитного потока, связанного с полюсами N и S и „пересекаемого" движущимся проводником, по которому идет ток от постороннего генератора. При этом, конечно, предполагается, что перемещение проводника всё время происходит под влиянием приложенной к нему электромагнитной силы.

Итак, в двигательном электромагнитном процессе мы всегда вообще встречаемся с такими структурными преобразованиями магнитного потока, которые характеризуются сращиванием магнитных звеньев, нанизанных на контур электрического тока и входящих в состав потока самоиндукции этой цепи, с магнитными линиями основного внешнего потока. С продвижением проводника в направлении действующей на него электромагнитной силы происходит последовательное выпрямление сильно искривленных магнитных линий. В связи с протеканием двигательного процесса магнитные звенья одно за другим выбывают из состава потока самоиндукции, сцепляющегося с рассматриваемым контуром тока, и как бы снимаются с проводника. Так происходит „пересечение" магнитных линий проводником в двигательном электромагнитном процессе. Непрерывное снятие магнитных звеньев с проводника в двигательном электромагнитном процессе мы воспринимаем как индуктирование в этом проводнике обратной электродвижущей силы.

В заключение настоящего параграфа сделаем еще небольшое замечание по поводу известных правил правой и левой руки и других предлагавшихся в разное время правил, которые могут служить руководством при определении направления индуктируемой электродвижущей силы или направления электромагнитной силы, возникающей в связи с взаимодействием проводника с током и внешнего магнитного поля. Если осно-

ваться на схеме происходящих в этих случаях процессов, иллюстрируемых рис. 88, 89 и 90, которые могут рассматриваться в прямом или обратном порядке, то все указанные правила становятся совершенно излишними. Необходимо только помнить об основном условии, которым принято связывать положительные направления всякого электрического тока и окружающего его магнитного поля (так называемое правило правого винта или правило штопора). Тогда в каждом частном случае, если ток уже существует в цепи, легко можно представить себе, каков будет результат наложения внешнего магнитного поля на собственное поле тока, т. е. с какой стороны проводника, по которому проходит электрический ток, получится сгущение и с какой стороны — разрежение магнитных линий. Электромагнитная сила, стремящаяся двигать проводник, всегда направлена от места сгущения магнитных линий к месту их разрежения. Что же касается направления индуктируемой электродвижущей силы, то всякий раз достаточно только иметь в виду описанную выше схему отпочковывания от главного потока магнитных звеньев, нанизывающихся на проводник. Из направления магнитных линий, образующих эти звенья, непосредственно вытекает направление индуктируемого тока, а также и совпадающее с ним направление индуктированной электродвижущей силы.

§ 34. Обратимость динамомашины

Открытие обратимости динамомашины, т. е. её способности работать и как электродвигатель, в свое время составило крупный этап в развитии электротехники. С одной стороны, указанное открытие дало простой и практически весьма удобный способ превращения энергии электрического тока в механическую работу. Этим было положено прочное основание для многочисленных применений электродвигателей в промышленности и в других областях народного хозяйства. С другой стороны, возможность использования электрической энергии с целью питания и приведения в действие двигателей послужила главным мотивом ряда изысканий, в конце концов приведших к решению проблемы передачи энергии на очень большие расстояния и к современному широкому распространению линий высокого напряжения, связывающих места генерирования электрической энергии с местами её потребления.

С точки зрения преобразований магнитного потока в генераторном и двигательном электромагнитных процессах обратимость динамомашины есть простое следствие взаимно обратного характера этих двух процессов. Всякое устройство, которое содержит в себе ту или иную систему проводников, способных перемещаться поперек некоторого основного магнитного потока, совершенно естественно может служить и для превращения работы механических двигателей в энергию индуктируемого электрического тока и для обратного получения механической работы за счет энергии электрического тока. Непрерывное перемещение проводников во внешнем магнитном поле осуществляется, как известно, путем вращения соответствующих органов динамоэлектрических машин, сокращенно называемых просто динамомашинами. Приводя во вращение такую машину от какого-либо механического двигателя (например, теплового или гидравлического), мы будем генерировать электрический ток. Наоборот, если через обмотку той же динамомашины пропускать ток от некоторого постороннего генератора, то машина начнет работать как электродвигатель, причем вращение будет происходить в обратную

сторону по сравнению с тем, что было, когда данная машина при прочих равных условиях использовалась в качестве генератора. Все это непосредственно вытекает из рассмотрения рис. 88–90 (см. §§ 32 и 33).

Остановимся теперь на схеме, изображенной на рис. 91. Здесь G есть генератор электрического тока, например динамомашина постоянного тока, M — электродвигатель, представляющий собою с конструктивной точки зрения точно такую же машину, l_1 и l_2 — соединяющие эти две машины провода, теоретически могущие иметь сколь угодно большую длину. Схема эта, конечно, ничего особенного в себе не заключает. Однако она до некоторой степени интересна в отношении энергетической стороны преобразований магнитного потока, происходящих в данных двух машинах. В генераторе G, при вращении его механическим двигателем, от главного магнитного потока отпочковываются магнитные звенья, которые нанизываются на проводники, уложенные в арматуре машины. Вследствие бокового распора эти магнитные звенья, непрерывно образующиеся в генераторе, не могут в нем накапливаться. Они будут со свойственною им скоростью распространяться по всей замкнутой цепи, доходят вдоль проводов l_1 и l_2 до электродвигателя M и распределяются по проводникам его арматуры. При работе электродвигателя магнитные звенья будут воссоединяться с его главным магнитным потоком и сниматься с проводников его арматуры. Таким образом, основной процесс в функционировании системы генератор-двигатель можно представить в следующем виде: магнитные звенья, отпочковывающиеся в машине G, непрерывно выбывают в машине M. С рассматриваемой точки зрения энергия передается от генератора к электродвигателю в основном именно движущимися магнитными звеньями, всё время притекающими к этому последнему по направляющим, роль которых играют провода линии l_1 и l_2. Следовательно, движущиеся магнитные звенья служат главными передатчиками энергии электрического тока.

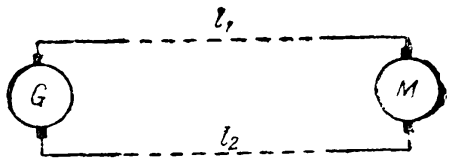


Рис. 91.

Как было уже разъяснено в § 21 Главы III, магнитные линии сами по себе являются носителями энергии магнитного поля. Но в случае передачи энергии магнитные линии движутся. Движение же магнитного поля, в данном случае в форме перемещающихся магнитных звеньев, мы должны воспринимать и воспринимаем как электрическое поле. Мы констатируем наличие этого электрического поля, обнаруживая разность потенциалов между проводами l_1 и l_2 и вообще между любыми двумя точками замкнутой цепи $G — l_1 — M — l_2 — G$.

Итак, мы имеем все основания утверждать, что энергия, передаваемая по проводам l_1 и l_2 от генератора G к электродвигателю M, состоит из двух частей. Одна часть есть энергия магнитного поля как такового. Другая часть есть энергия движения магнитных линий, образующих магнитное поле тока (причем это второе слагаемое мы обычно понимаем как энергию электрического поля). Делая подобное заключение, мы тем самым приписываем магнитным линиям способность быть носителями энергии их движения, т. е. приписываем им свойство инерции. Как мы указывали в § 22 Главы III и как увидим дальше (§§ 47—49 Главы VI), это в полной мере соответствует общему характеру проявлений магнитного потока. Существует, впрочем, и несколько иная точка зрения, которая рассматривает электрическое поле в качестве основной физической реальности. Во всяком случае, однако, природа электрического поля имеет тесную связь с природой магнитного поля (см. об этом §§ 64—66 Главы VI). Не исключена возможность, что расхождение двух указанных

точек зрения является чисто формальным и что по существу в электрическом поле мы встречаемся с некоторым кинетическим процессом, принципиально не отличающимся от того, с чем мы имеем дело при движении магнитных линий.

Провода передающей линии, а также все проводники, входящие в состав обмоток генератора и электродвигателя, обычно всегда обладают некоторым конечным электрическим сопротивлением. Вследствие этого часть генерируемой и передаваемой электромагнитной энергии расходуется на преодоление сопротивления цепи, т. е. на образование джоулева тепла. Если бы указанное электрическое сопротивление было равно нулю, то весь процесс передачи энергии, очерченный выше, протекал бы в чистом виде. Магнитные звенья, отпочковывающиеся в генераторе G, все без какого-либо исключения могли бы доходить до электродвигателя M, где они снимаются с контура цепи. Наличие конечного сопротивления электрической цепи несколько осложняет процесс убывания запаса магнитных звеньев, непрерывно возобновляемого в генераторе G. Об этом будет еще речь в следующей Главе VI, посвященной вопросу о природе электрического тока.

§ 35. Процесс электромагнитной индукции при симметричных преобразованиях магнитного потока

а. В § 32 мы рассматривали процесс электромагнитной индукции с точки зрения тех преобразований магнитного потока, которые при этом совершаются, и пришли к заключению, что необходимым следствием признания физической реальности потока является представление об образовании магнитных звеньев, отделяющихся во время данного процесса от внешнего магнитного потока и нанизывающихся на контур замкнутой цепи проводника. Мы показали, каким образом в основном случае надо понимать так называемое „пересечение“ магнитных линий движущимся проводником. Собственно говоря, это не есть пересечение в подлинном смысле слова, а лишь определенный процесс, который приводит к сцеплению контура некоторой магнитной линии с контуром электрического тока или к расцеплению указанных двух контуров, принципиально всегда замкнутых. Вместе с тем магнитные линии внешнего потока оказываются перекинувшимися с одной стороны проводника на другую сторону.

В отношении дальнейшего углубления в существо процесса индуктирования электрического тока представляют особенный интерес некоторые специальные случаи симметричного преобразования магнитного потока, отличающиеся от обычных случаев, когда имеют место простое относительное перемещение проводника и внешнего магнитного поля. Мы увидим, что иногда могут возникать своеобразные затруднения при применении закона электромагнитной индукции, выражаемого в виде первой или второй его формулировки (фарадеевской или максвелловской).

б. Начнем с обследования случая симметричного преобразования магнитных потоков, связанных с системой тождественных постоянных магнитов. Допустим, что эти магниты расположены симметрично на равных расстояниях вокруг прямолинейного проводника таким образом, чтобы ось каждого отдельного магнита была перпендикулярна к линии, соединяющей середину магнита с осью проводника. Пусть затем все магниты лежат в одной плоскости, нормальной к оси проводника, и обращены друг к другу противоположными полюсами. Получим расположение,

изображенное на рис. 92, где *NS*, *NS*... суть магниты, размещенные по окружности, в центре которой мы видим сечение прямолинейного проводника, перпендикулярного плоскости чертежа. Предположим далее, что магниты, сохраняя указанное расположение, симметричное относительно проводника, могут двигаться поступательно в радиальном направлении, либо сближаясь (рис. 92) и доходя при этом до предела (рис. 93), либо удаляясь друг от друга и от центра (рис. 94). На рис. 92 и 94 стрелками показано направление движения магнитов. Если представить себе эти магниты вначале весьма удаленными друг от друга, то магнитные потоки, связанные с каждым из них, необходимо рассматривать как совершенно обособленные. Однако по мере сближения магнитов их потоки будут приходить в соприкосновение, будут сращиваться (рис. 92) и в пределе образуют один общий магнитный поток, полностью сцепляющийся с проводником (рис. 93). При обратном движении, т. е.

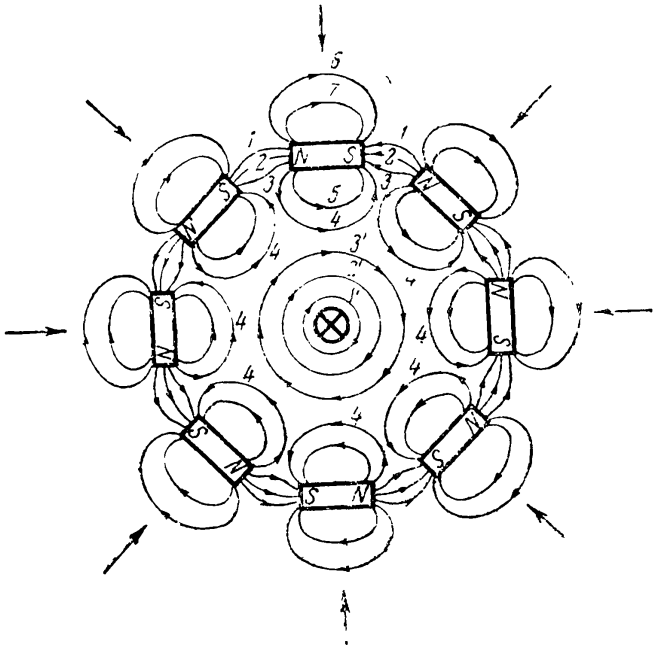


Рис. 92.

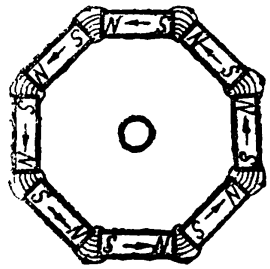


Рис. 93.

при удалении магнитов от центра, общность и единство магнитного потока нарушаются (рис. 94), причем процесс этот протекает последовательно, вплоть до начального состояния полного разделения общего потока на обособленные части, связанные только с каждым отдельным магнитом. В результате сцепление указанного общего потока с проводником прекращается.

Рассмотрим теперь подробнее те структурные преобразования магнитного потока, которые должны происходить при сближении и раздвижении симметрично расположенных магнитов. Во время сближения магнитов (рис. 92) приходят во взаимный контакт те магнитные линии их потоков, которые находятся в благоприятных для сращивания условиях. На рис. 92 магнитные линии размечены номерами (от *1* до 7). Интересующие нас в данный момент линии, приходящие в соприкосновение, помечены номером *4*. Сращивание этих линий последует в тех местах, где они наиболее сближены и где именно вступают в непосредственный контакт их противоположно направленные участки. В условиях принятой схемы опыта все места контактов расположены вполне симметрично вокруг оси проводника. Происходящее при этом преобразование магнитных линий *4* в один общий контур, проходящий через все магниты, должно сопровождаться отделением от них участков со стороны проводника, являю-

щихся, так сказать, „отходами“ в описываемом процессе. Указанные „отходы“ магнитных линий *4* также должны срастись и образовать замкнутое магнитное звено, окружающее проводник подобно магнитным звеньям *1'*, *2'* и *3'*, которые уже нанизаны на проводник и могут рассматриваться в качестве таких же „отходов“ магнитных линий *1*, *2* и *3*, ранее претерпевших свое структурное преобразование.

В данном случае симметричных преобразований магнитного потока все происходит, надо полагать, так же, как и в аналогичном случае преобразования дымовых колец (см. § 29, рис. 79—81), когда сращивание ряда подобных колец, равномерно распределенных по некоторой окружности, несомненно должно приводить к образованию двух вихревых колец большего размера, направленных в противоположные стороны.

Таким образом, во время сближения магнитов преобразование связанных с ними потоков приводит к образованию двух различных систем магнитных линий. Первая система составляет магнитный поток, общий для всех магнитов и проходящий через них. Вторая система магнитных линий уже никак не связана с магнитами и представляет собой магнитные звенья, нанизавшиеся на проводник, который можем считать замыкающимся где-либо вдали от расположения магнитов. В высокой степени важно обратить внимание на следующее существенное обстоятельство. Обе указанные системы магнитных линий имеют прямо противоположное направление. Это ясно видно на рис. 92 (см. магнитные линии *1*, *2*, *3* и *1'*, *2'*, *3'*). В то же время всё это находится в полном соответствии с направлением индуктированного в данном случае тока, поток самоиндукции которого включает в себя магнитные звенья *1'*, *2'*, *3'* и т. п.

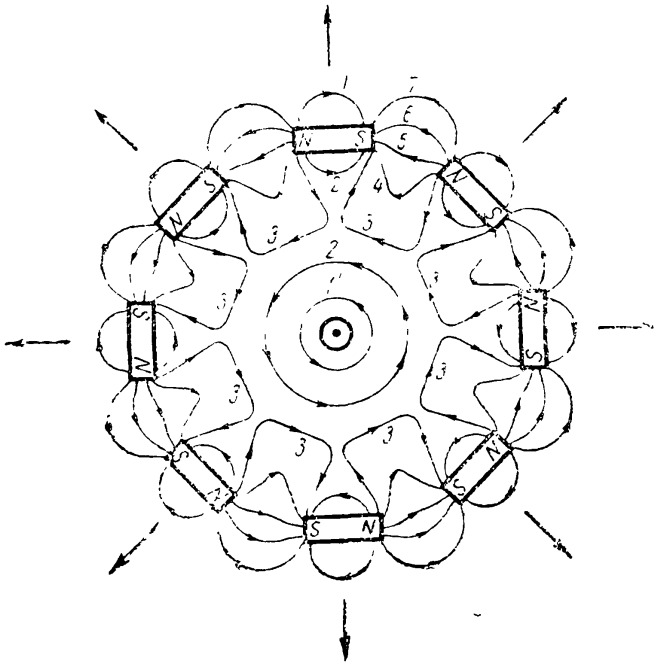


Рис. 94.

Если электрическое сопротивление цепи индуктированного тока имеет конечное значение, что обычно и бывает, то вся энергия возникшего потока самоиндукции вскоре израсходуется на образование джоулева тепла, и ток прекратится немедленно после полного сближения магнитов (рис. 93). Стрелками на этом рисунке показано направление общего для всех магнитов потока, полностью охватывающего теперь проводник.

При обратном движении магнитов от центра преобразование единого потока в обособленные потоки, связанные только с каждым магнитом в отдельности, происходит по схеме, представленной на рис. 94. Здесь, например, магнитная линия *3* изображена в форме, непосредственно предшествующей ее структурному преобразованию и стадии контакта между рядом попарно противоположных ее элементов. Из этого неустойчивого состояния магнитная линия *3* переходит через стадию контакта к образованию из участков, органически связанных с магнитами, — обособленных магнитных линий, подобных линиям *1* и *2*. Из остающихся же участков, являющихся как бы „отходами“, составляется одно магнитное звено, подобное звеньям *1'* и *2'*, уже нанизавшимся на проводник. Характерно следующее обстоятельство. В данном случае направление от-

делившихся магнитных звеньев будет то же самое, что и у исчезающего и преобразуемого общего магнитного потока. Это опять-таки находится в полном согласии с направлением тока, индуктируемого при раздвигании магнитов. Вернее сказать, возникающие магнитные звенья, входя в состав потока самоиндукции индуктируемого тока, своим направлением именно и определяют направление этого тока, которое обратно тому, что было в случае сближения магнитов.

в. Рассмотрим теперь второй пример расположения, в котором происходит индуктирование электрического тока при симметричных преобразованиях магнитного потока. Допустим, что мы имеем железное кольцо, представляющее собой сердечник кольцевого трансформатора и обмотанное изолированной проволокой. Пусть первичная обмотка состоит, скажем, из восьми витков, совершенно равномерно распределенных (рис. 95). Вторичная обмотка состоит из прямолинейного проводника, перпендикулярного плоскости кольца и расположенного вдоль оси симметрии всей системы. Где-либо в стороне этот проводник замыкается, образуя вторичную цепь. Предположим далее, что мы извне подводим ток в первичную обмотку в направлении, указанном на рисунке, и создаем магнитный поток в сердечнике. Магнитный поток в данной системе появляется под действием внешнего генератора. Самый процесс возникновения данного потока мы должны мыслить, по Фарадею, как результат развития магнитного поля в пространстве, окружающем части первичной обмотки, в виде замкнутых магнитных линий, охватывающих сначала каждый отдельный виток данной обмотки. Эти реально существующие магнитные линии последовательно отходят от проводника в течение времени установления тока в нем. Они распространяются от него во все стороны, растягиваясь до тех пор, пока магнитное поле тока не достигнет своего наибольшего значения. Обратное движение магнитных линий имеет место в случае прекращения тока. Они сокращаются и стягиваются по направлению к проводнику, несущему ослабевающий электрический ток.[1]

Во время установления тока в первичной обмотке магнитные линии, связанные с нею, подвергаются структурным преобразованиям совершенно подобно тому, как это изображено на рис. 92 для рассмотренного выше примера с постоянными магнитами, которые сближаются. Магнитные звенья, связанные с отдельными витками, будут сращиваться и сливаться в общий магнитный поток, проходящий по железному сердечнику и при этом оказывающийся в состоянии сцепления с контуром центрального вторичного провода (рис. 95). Одновременно, благодаря сращиванию отходящих участков основных магнитных линий, образуются магнитные звенья, вполне прервавшие непосредственную связь с витками первичной обмотки и нанизанные на тот же центральный прямолинейный провод вторичной цепи. И в этом примере возникшие указанным путем свободные магнитные звенья входят в состав потока самоиндукции вторичной цепи и своим направлением определяют направление индуктированного электрического тока для случая, когда первичный ток усиливается.

На рис. 96 изображена схема обратных структурных преобразований, претерпеваемых главным магнитным потоком кольцевого трансформатора при убывании тока в первичной обмотке. Все магнитные линии этого потока, в своем стремлении приблизиться к проводнику со слабеющим током, будут расчленяться на обособленные звенья, охватывающие каждый

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. I, 238. См. также § 38 настоящей Главы IV.

отдельный виток первичной обмотки. Одновременно из отходящих участков преобразующихся магнитных линий будут составляться свободные магнитные звенья, нанизывающиеся на центральный прямолинейный провод. Направление этих магнитных звеньев будет то же, что у потока, исчезающего из железного сердечника, в полном соответствии с направлением индуктируемого в данном случае тока.

г. Представим себе, наконец, что замкнутая цепь центрального прямолинейного проводника лишена обычного электрического сопротивления, т. е. образована из сверхпроводников. В таком случае магнитные звенья, нанизавшиеся на контур этой цепи при полном сближении магнитов (рис. 92 и 93) или при достижении некоторого максимального значения тока в первичной обмотке (рис. 95), будут неизменно сохраняться в качестве составляющих возникшего потока самоиндукции, сцепляющегося со сверхпроводящим замкнутым контуром (см. §§ 50 и 51 Главы VI). В связи с этим несколько изменится картина преобразований

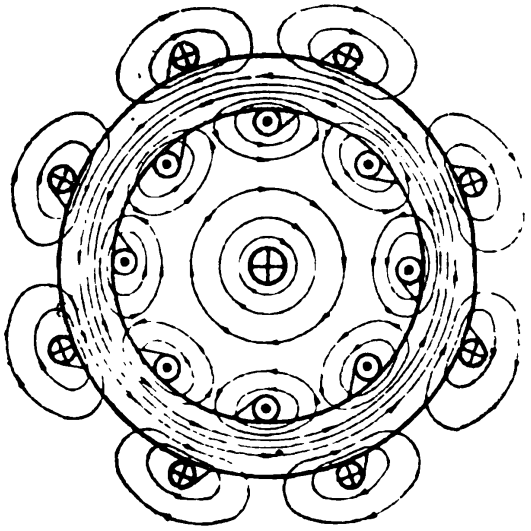


Рис. 95.

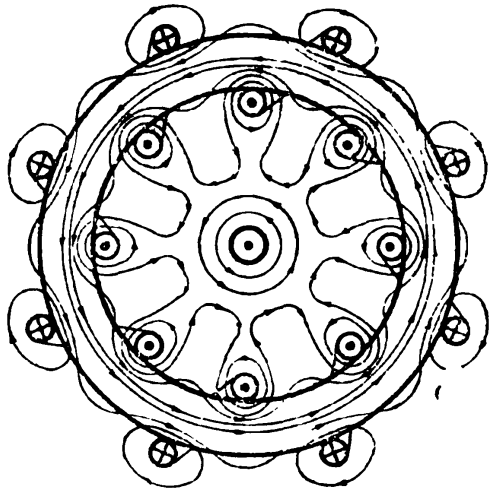


Рис. 96.

магнитного потока при раздвижении магнитов (рис. 94) или при убывании тока в первичной обмотке (рис. 96). В обоих случаях наличие потока самоиндукции, остающегося связанным со сверхпроводящей цепью, приведет к тому, что магнитные звенья данного потока будут принимать активное участие в процессе обратных симметричных преобразований и будут последовательно сниматься с прямолинейного проводника. Мы не останавливаемся особо на изменениях, которые при новых условиях необходимо внести в схематические рисунки 94 и 96. После всего сказанного это ясно само собой. Следует только подчеркнуть, что при раздвижении магнитов до исходного положения или при полном прекращении тока в первичной обмотке все без исключения магнитные звенья потока самоиндукции окажутся в конце концов снятыми с прямолинейного проводника. Иными словами, электрический ток в сверхпроводящей цепи прекратится.

§ 36. Третья формулировка закона электромагнитной индукции

а. В случае симметричных преобразований магнитного потока, рассмотренных в предыдущем параграфе, индуктирование электрического тока протекает в условиях, когда трудно и, повидимому, совершенно невозможно описывать этот процесс с точки зрения обычного представ-

ления о так называемом „пересечении" магнитных линий проводником. Всё происходит без какого-либо перехода или перебрасывания магнитных линий с одной стороны проводника на другую. Следовательно, в данном случае количественная сторона явления не может быть охарактеризована первой (фарадеевской) формулировкой закона электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\Phi''}{dt},$$

где $d\Phi''$ есть элементарное количество магнитных линий, именно „пересекаемых" проводником. Этой формулировки нельзя здесь применить, как бы мы ни пытались понимать распространительно термин „пересечение".

Вторая (максвелловская) формулировка того же закона электромагнитной индукции по своему существу представляет собою не что иное, как лишь известное видоизменение первой формулировки, основанное на учете принципа непрерывности магнитного потока. Принимая во внимание этот принцип, Максвелл и установил, что

$$d\Phi = d\Phi'',$$

где $d\Phi$ есть элементарное изменение магнитного потока, охватываемого некоторым замкнутым контуром (§ 18 Главы III). Отсюда и вытекает вторая формулировка

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Таким образом, в случае симметричных преобразований магнитного потока и применимость второй формулировки может показаться не вполне правомерной, поскольку нельзя уже говорить о том, что элементарное изменение магнитного потока, охватываемого некоторым контуром, в точности равно элементарному количеству „пересеченных" этим контуром магнитных линий.

Необходимо еще обратить внимание на следующее обстоятельство, особенно отчетливо проявляющееся при наличии сверхпроводящих цепей. Как мы указывали уже по поводу схем, изображенных на рис. 92 и 95, образование одной магнитной линии, проходящей через все магниты или через весь железный сердечник и сцепляющейся с контуром тока (вторичным), обязательно сопровождается возникновением одного же магнитного звена, имеющего обратное направление и нанизываемого на тот же контур тока. В случае, если данный контур составлен из сверхпроводников, подобные магнитные звенья сохраняются неопределенно долго, в совокупности образуя собственный магнитный поток контура тока, т. е. поток самоиндукции. При этом оказывается равным нулю полное приращение результирующего магнитного потока, сцепляющегося с рассматриваемым сверхпроводящим контуром и выражаемого алгебраической суммой внешнего магнитного потока и потока самоиндукции. Если под Φ подразумевать именно суммарный магнитный поток, то мы будем иметь:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = 0,$$

т. е. полная электродвижущая сила, индуктируемая в сверхпроводящей цепи, всегда равна нулю.[1] Мы знаем, однако, что в сверхпроводящих

[1] Отдельные составляющие указанной полной электродвижущей силы подвергнуты специальному рассмотрению в § 57 Главы VI, где речь идет именно о сверхпроводящей цепи.

цепях может возникнуть и возникает индуктированный электрический ток (§§ 50 и 51 Главы VI). Суть же дела в том, что создаются условия, благодаря которым происходит образование магнитных звеньев, нанизываемых на контур сверхпроводящей цепи и входящих в состав ее потока самоиндукции.

В обычных случаях (рис. 88—90) каждая отдельная составляющая потока самоиндукции отпочковывается от соответствующей магнитной линии внешнего потока, „пересекаемого" проводником. При симметричных же преобразованиях магнитного потока каждое магнитное звено потока самоиндукции образуется путем сращивания ряда согласно направленных участков, ранее структурно входивших в состав различных внешних магнитных линий (рис. 92 и 95) или выделяемых из различных мест одной и той же магнитной линии (рис. 94 и 96). Во всех случаях сверхпроводящих цепей приращение потока самоиндукции равно по абсолютной величине и обратно по знаку одновременному приращению внешнего магнитного потока, сцепляющегося с контуром тока. В общем же случае генераторного электромагнитного процесса непрерывно возобновляемый запас магнитных звеньев потока самоиндукции, или, вернее сказать, несомая ими энергия, расходуется при образовании джоулева тепла, а также в иных энергетических преобразованиях, которые могут происходить в цепи (например, в электродвигателях). Если энергия индуктируемого тока расходуется только на образование джоулева тепла, то уравнение электродвижущих сил принято, как известно, выражать в такой форме:

$$-\frac{d(\Phi'+Li)}{dt}=ri,$$

или

$$-\frac{d\Phi'}{dt}-\frac{d(Li)}{dt}=ri,$$

где Φ' есть внешний магнитный поток, сцепляющийся с контуром тока, а Li — поток самоиндукции этого контура. Здесь во втором уравнении полная индуктируемая электродвижущая сила явно представлена как сумма двух взаимно противоположных электродвижущих сил, соответственно двум составляющим полного магнитного потока, изменения которых всегда обратны по знаку.

Можно себе представить, что магнитный поток Φ' изменяется с некоторою постоянною скоростью в течение какого-либо промежутка времени, практически всё же довольно длительного. В таком случае, по миновании начального периода установления постоянного тока в цепи, будем иметь:

$$-\frac{d(Li)}{dt}=0.$$

Внешне всё будет происходить так, как будто бы никаких электродвижущих сил самоиндукции в цепи нет. В действительности же, с рассматриваемой точки зрения поток самоиндукции находится в некотором подвижном равновесии, и можно говорить о наличии в этом случае двух электродвижущих сил самоиндукции, равных по величине и обратных по знаку. Первая возникает в связи с непрерывным возобновлением запаса магнитных звеньев потока самоиндукции. Вторая же электродвижущая сила самоиндукции обусловлена соответствующим и равным по абсолютной величине расходованием этих магнитных звеньев при образовании джоулева тепла.

Итак, совершенно независимо от частных условий, в которых происходит индуктирование электрического тока и возникает индуктированная электродвижущая сила, общим моментом, объединяющим всевозможные случаи осуществления этого основного электромагнитного явления, оказывается нанизывание магнитных звеньев на контур тока или снятие магнитных звеньев с этого контура и их выбывание. Всё это протекает согласно схемам, рассмотренным выше.

6. Мы сделали ряд предварительных замечаний по поводу теснейшей связи явлений электромагнитной индукции с процессами, в которых основную роль играют магнитные звенья, нанизываемые или уже нанизанные на контур электрического тока. Перейдем теперь к вопросу о том, в какой мере представление об этих магнитных звеньях может быть использовано при количественном описании данного явления.

Обозначим через θ количество магнитных звеньев, сцепляющихся с контуром тока. Из всего того, что было сказано по поводу рис. 88—90 (§§ 32 и 33) и рис. 92—96 (§ 35), вытекают соотношения

$$d\theta = -d\Phi'',$$

где $d\Phi''$ есть элементарное количество „пересекаемых" магнитных линий внешнего потока в случаях, когда можно говорить о подобном „пересечении", и

$$d\theta = -d\Phi,$$

где $d\Phi$ есть элементарное приращение внешнего магнитного потока, охватываемого некоторым контуром.

На основании этого можем следующим образом представить *третью формулировку* закона электромагнитной индукции:

$$e = \frac{d\theta}{dt}.$$

Несколько иной вид приобретает третья формулировка, если будем исходить не из рассмотрения постороннего или внешнего магнитного потока, а из рассмотрения магнитного потока, органически связанного с процессом электрического тока, т. е. если сосредоточим внимание на потоке самоиндукции

$$\Phi_s = Li.$$

В данном случае, конечно, имеем

$$d\theta = d\Phi_s = d(Li).$$

Поэтому электродвижущая сила самоиндукции должна выразиться через θ так:

$$e = -\frac{d\theta}{dt}.$$

Следовательно, индуктированная электродвижущая сила вообще может быть трактуема как взятая с тем или иным знаком скорость возникновения магнитных звеньев, нанизанных на контур тока.

Приведенное выше уравнение электродвижущих сил для цепи с конечным сопротивлением можно, например, написать в следующем виде, применяя третью формулировку:

$$\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta'}{dt} = ri.$$

Здесь θ есть количество магнитных звеньев, отпочковываемых от внешнего магнитного потока, а θ' — количество магнитных звеньев потока самоиндукции.

В третьей формулировке знак плюс (+) относится ко всем случаям, когда процесс электромагнитной индукции связан с преобразованиями внешнего магнитного потока, от которого могут отпочковываться магнитные звенья (генераторный процесс) и с которым они могут воссоединяться (двигательный процесс). Знак же минус (—) относится ко всем случаям возникновения электродвижущей силы самоиндукции, когда запас магнитных звеньев потока самоиндукции претерпевает те или иные количественные изменения, рассматриваемые вне их возможной связи с преобразованиями внешнего магнитного потока.

Сопоставляя все три формулировки закона электромагнитной индукции, получаем следующую систему соотношений:

$$e = -\frac{d\Phi''}{dt}, \tag{1}$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{2}$$

$$e = \pm\frac{d\theta}{dt}. \tag{3}$$

Третья формулировка закона электромагнитной индукции, подобно первой, учитывает локализацию процесса индукции, охватывая вместе с тем и те случаи, когда нельзя говорить о „пересечении" магнитных линий и о перекидывании их с одной стороны проводника на другую, как это мы имеем при симметричных преобразованиях магнитного потока или при изменениях, а также при перераспределениях потока самоиндукции. В последнем случае использование первой и второй формулировок затруднительно.

Кроме того, третья формулировка отчетливо различает (по знаку) индуктивные процессы, связывающие рассматриваемую электрическую цепь с другими электромагнитными системами, и индуктивные процессы, происходящие в самой данной цепи, как если бы она была совершенно обособленной системой.

Вторая же формулировка имеет дело с общим эффектом, обнаруживаемым при всяком изменении магнитного потока, сцепляющегося с рассматриваемым контуром, но при этом не учитывается локализация процесса электромагнитной индукции, что в действительности несомненно всегда необходимо иметь в виду.

Отметим, что данная третья формулировка, вытекающая из рассмотрения весьма существенных подробностей процесса электромагнитной индукции тока, подтверждает справедливость второй формулировки и в случаях, когда первая формулировка не приложима.

Ясно, конечно, что в случае электрически неизменяемого контура (§ 20 Главы III) все три формулировки закона электромагнитной индукции вполне эквивалентны одна другой и, вообще говоря, приводят к одним и тем же результатам, лишь фиксируя внимание на различных сторонах рассматриваемого явления.

§ 37. Преобразование магнитного потока тороидальной обмотки, окруженной замкнутым железным экраном

а. При рассмотрении симметричных преобразований магнитного потока в случаях, схематически представленных на рис. 95 и 96 (§ 35), мы пришли к заключению, что во время усиления или ослабления электрического тока, намагничивающего кольцевой железный сердечник, должны образовываться магнитные кольца или звенья, освобождающиеся от непосредственной связи с железным сердечником и могущие обусловить индуктивное действие во вторичной цепи. На рис. 97 изображен подобный железный сердечник в форме кольца или тора со сравнительно большим числом витков равномерно наложенной на него обмотки. Направление освободившихся магнитных звеньев показано для случая усиления намагничивающего тока (центральный прямолинейный проводник здесь не изображен). Однако действительное осуществление условий полной симметрии практически весьма мало вероятно, так как невозможно достигнуть абсолютной равномерности в наложении обмотки. К тому же практически нельзя обеспечить и абсолютной точности геометрических размеров кольцевого железного сердечника, а также полной однородности его материала. Поэтому в реальных условиях необходимо считаться с тем, что рассматриваемый процесс преобразований магнитного потока будет происходить несколько иначе.

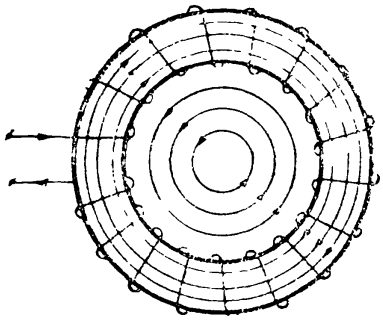


Рис. 97.

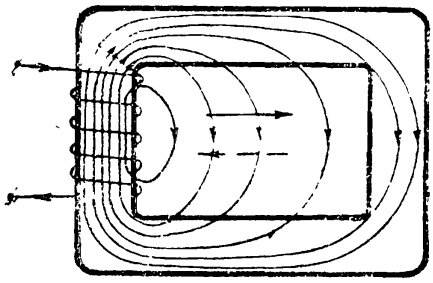


Рис. 98.

Указанные неравномерности и неточности, нарушающие симметрию всей системы, представлены на рис. 98 в усиленном до предела виде. Здесь железный сердечник имеет форму, сильно отличающуюся от формы кольца, а намагничивающие витки сосредоточены в одной части сердечника. В этом случае процесс намагничения железного сердечника и возникновения магнитного потока, проходящего через него, необходимо представить себе следующим образом, исходя из всего того, что было сказано раньше. Магнитные звенья, входящие в состав увеличивающегося потока самоиндукции первичной цепи и первоначально сцеплявшиеся с отдельными ее витками, последовательно претерпевают взаимное сращивание и сливаются в большие контуры, охватывающие уже значительное число витков и стремящиеся охватить по возможности все витки. Такие результирующие магнитные линии проникают в железный сердечник, в основном полностью размещаясь в нем. При этом магнитные линии сначала входят в ту часть сердечника, на которую непосредственно наложены витки, а затем, распространившись через воздух в направлении, показанном сплошной стрелкой, дойдут до других частей замкнутой железной рамы. При достижении некоторой максимальной силы тока магнитные линии практически в очень значительном числе будут проходить по же-

лезу и лишь сравнительно малая доля их составит так называемый поток рассеяния, проходящий на своем пути частью через железо, а частью через воздух. В случае последующего ослабления тока и уменьшения всего магнитного потока магнитные линии выходят из железа и, стягиваясь к проводнику, претерпевают обратное преобразование, связанное с разделением их на магнитные звенья, охватывающие только отдельные витки обмотки. При этом по воздуху магнитные линии будут пробегать в обратном направлении, показанном на рис. 98 пунктирной стрелкой.

В общем подобную же картину реальных преобразований магнитного потока необходимо представить себе и в случаях практического осуществления тороидальной обмотки, наложенной на железный сердечник, более или менее правильно выточенный (рис. 99). Как бы мы ни стремились расположить равномерно витки обмотки, всегда получится, что в каком-либо месте витки лежат несколько гуще. Вследствие этого симметрия преобразований магнитного потока нарушится, и от указанного места магнитные линии, образовавшиеся путем сращивания отдельных магнитных звеньев, будут перебегать через воздух при усилении нама-

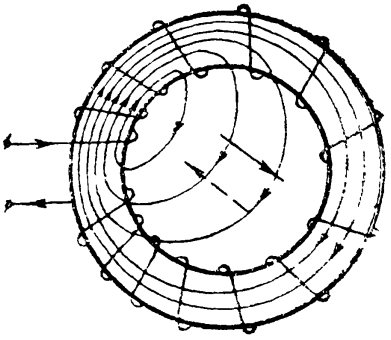


Рис. 99.

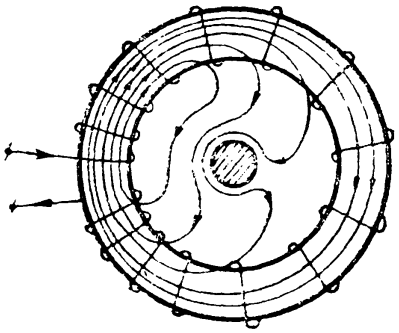


Рис. 100.

гничивающего тока в направлении, показанном сплошной стрелкой, а при ослаблении тока — в обратном направлении (пунктирная стрелка).

На своем пути перебегающие магнитные линии могут встречать проводники вторичной обмотки и производить в них индуктивный эффект в форме отпочкования магнитных звеньев, нанизываемых на контур вторичной цепи. Образование, так сказать, свободных магнитных колец или звеньев возможно, однако, и в том случае, если на пути перебегающих магнитных линий встретится вообще какое-либо препятствие, заставляющее их обходить его, соответственным образом при этом деформируясь. Такой случай и представлен на рис. 100, где в центральной части показан в разрезе некоторый непроницаемый для магнитных линий цилиндр, перпендикулярный плоскости чертежа. При обходе магнитными линиями данной преграды от них также будут отделяться магнитные кольца или звенья подобно тому, что должно происходить в случае симметричных преобразований магнитного потока.

Во всяком случае с фарадее-максвелловской точки зрения необходимо полагать, что перебегающие магнитные линии вообще или отделяющиеся от главного магнитного потока и сокращающиеся магнитные кольца, в частном случае его симметричных преобразований, должны предварительно пройти некоторый путь, прежде чем они окажутся в непосредственной близости ко вторичному проводнику, где возбудят индуктированную электродвижущую силу. Если такая схема происходящих

процессов соответствует действительности, то, казалось бы, перехватив как-либо перебегающие магнитные линии или сокращающиеся свободные магнитные кольца и не допустив их, таким образом, ко вторичному проводнику, — мы должны в большей или меньшей степени ослабить индуктивный эффект. Для этого можно было бы воспользоваться свойством железа сохранять остаточное намагничение, т. е. задерживать часть магнитных линий, вошедших в железо. Необходимо только создать такие условия, чтобы кольцевые магнитные линии, освободившиеся от связи с главным магнитным потоком и могущие служить переносителями электромагнитной энергии из первичной цепи во вторичную, обязательно должны были полностью пройти сквозь промежуточную толщу железа. С целью проверки ряда вышеизложенных соображений были произведены специальные опыты, в которых тороидальная обмотка с находящимся внутри ее железным сердечником была окружена со всех сторон массивным железным же кожухом.[1]

б. На рис. 101 схематически изображено расположение, примененное в указанных опытах. Здесь T представляет собой железное кольцо (в разрезе) с наложенной на него тороидальной обмоткой, которая возбуждается замыканием рубильника L через регулировочный реостат R и амперметр A от зажимов C и D цепи постоянного тока. Железное кольцо расположено перпендикулярно плоскости чертежа. P и Q — две половины (щеки) массивного железного кожуха или экрана, охватывающего кольцо T со всех сторон. Эти половины экрана по возможности плотно пригнаны и пришлифованы одна к другой. B_1 B_2 есть след плоскости соприкосновения щек P и Q. Одна из них снабжена каналом для пропуска необходимых проводников (ради большей ясности схемы на рисунке показаны два канала). Поверх первичной обмотки на кольцо наложена контрольная обмотка K. После того как железный экран сложен надлежащим образом, выполняется вторичная обмотка $S_1 S_2 S_3$, проходящая через центральное отверстие в щеках экрана. В цепь вторичной обмотки включается флюксметр или баллистический гальванометр G. Сверх того, в эту же цепь навстречу включена контрольная обмотка K, причем с помощью рубильников M и N можно составлять различные комбинации из этих обмоток. Именно, закрывая рубильник M, т. е. коротко замыкая вторичную обмотку $S_1 S_2 S_3$, мы при посредстве контрольной обмотки K можем измерить величину возникающего в кольце T приращения магнитного потока $\Delta\Phi_1$, действие которого на вторичную обмотку $S_1 S_2 S_3$ мы хотим до некоторой степени заэкранировать сложенными железными щеками P и Q. Закрывая же рубильник N при разомкнутом M, мы получаем возможность измерить флюксметром величину магнитного потока $\Delta\Phi_2$, который обусловил индуктивный эффект во вторичной

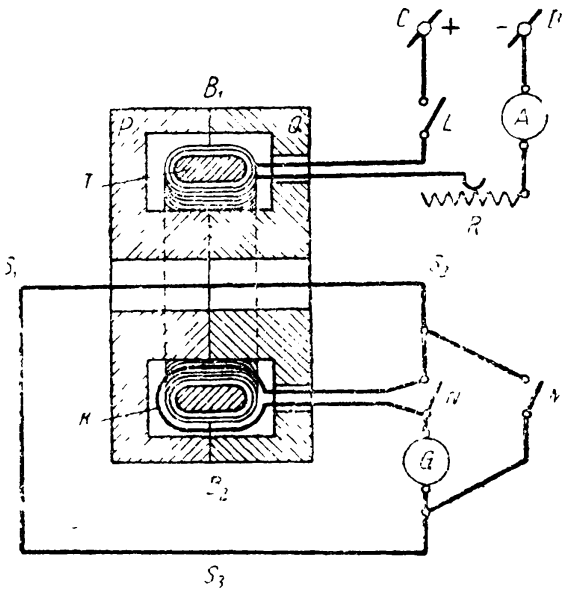


Рис. 101.

[1] Описываемое опытное исследование было выполнено мною в 1925 и 1927 гг. *В. Миткевич.*

обмотке $S_1S_2S_3$ при замыкании или размыкании тока в первичной обмотке. Наконец, оставляя оба рубильника M и N открытыми, т. е. имея цепь $S_1S_2KGS_3S_1$, мы можем измерить разность между тем индуктивным эффектом во вторичной цепи, который получили бы при отсутствии железного экрана, и тем, что получается в действительности, когда экран задерживает часть магнитных колец или звеньев, образующихся в результате преобразования главного магнитного потока. Как это ясно видно из схемы (рис. 101), мы в данном случае измеряем величину именно того магнитного потока $\Delta\Phi_3$, который задерживается экраном на пути от первичной обмотки ко вторичной. В самом деле, при встречном включении обмоток из замкнутого контура, проходящего через флюксметр G, исключается основной магнитный поток железного кольца T. Следовательно, с контуром вторичной цепи при этом длительно сцепляются только кольцевые магнитные линии в количестве $\Delta\Phi_3$, задержанные железным экраном.

Кольцо T и щеки P и Q были изготовлены из железа, не обладавшего особо высокими магнитными свойствами. Площадь поперечного сечения кольца T была около 2.7 см^2, а средний диаметр кольца был равен 10 см. Площадь сечения железного экрана PQ, используемая для перехватывания радиально сокращающихся магнитных звеньев, была равна 36 см^2. На кольцо T было наложено в два слоя и достаточно равномерно 367 витков первичной обмотки из изолированного проводника диаметром в 1 мм. Вторичная обмотка $S_1S_2S_3$ и контрольная обмотка K в действительности содержали по 50 витков каждая.

Включение и прерывание первичного тока производили один и тот же индуктивный эффект (по абсолютной величине) при некоторой определенной силе этого тока, если только вся магнитная система была предварительно приведена в устойчивое состояние путем повторных замыканий и размыканий рубильника L. При производстве опытов сила первичного тока в различных случаях была от 0.25 А до 30 А. Ток подводился от цепи с напряжением в 120 V.

Наблюдения с описанной схемой дали следующие результаты. Когда щеки железного экрана P и Q были раздвинуты или когда они были сложены без достаточного контакта между ними, замыкание и размыкание первичного тока вызывало во вторичной обмотке $S_1S_2S_3$ индуктивный эффект приблизительно на $^1/_2{}^0/_0$ больший, чем в контрольной обмотке K. Это, очевидно, было результатом сосредоточения контрольной обмотки в одном месте, вследствие чего она не охватывала всего первичного потока, отчасти рассеиваемого по причине неоднородности материала кольца T, а также по причине неравномерностей в распределении витков первичной обмотки. Таким образом, при встречном включении двух обмоток, контрольной и вторичной, флюксметр G давал очень небольшое отклонение, определяемое направлением электродвижущей силы, индуктируемой во вторичной обмотке. Указанным небольшим отклонением, вызванным неточностями в изготовлении отдельных частей устройства, конечно, можно совершенно пренебречь при рассмотрении общего характера наблюденных явлений.

Когда щеки железного экрана P и Q были более или менее плотно прижаты одна к другой при помощи особого винта (не показанного на рис. 101), замыкание или размыкание первичного тока стало давать весьма различный индуктивный эффект в контрольной и вторичной обмотках.

При этом во вторичной обмотке эффект неизменно получался меньший, чем в контрольной обмотке. В виде примера можно указать, что

в некотором частном случае при замыкании первичного тока в 10 А было получено:

$$\Delta\Phi_1 = 25\,000 \text{ максвеллов}$$

$$\Delta\Phi_2 = 17\,500 \quad \text{„}$$

$$\Delta\Phi_3 = 7\,500 \quad \text{„}$$

т. е. из потока в 25 000 максвеллов, возникшего в железном кольце T в связи с установлением тока в тороидальной (первичной) обмотке, до вторичной обмотки дошло индуктивное действие только от 70% этого потока, именно от 17 500 максвеллов. Действие же остальных 7500 максвеллов было задержано железом экрана PQ, и они оказались неактивными в отношении вторичной обмотки.

Так как опыт показал желательность плотного контакта между щеками P и Q для успеха экранировки, то были приняты меры к улучшению этого контакта. Было очевидно, что необходимо улучшить контакт в электрическом отношении, чтобы облегчить возникновение в массе железного кожуха кратковременных токов, которые всегда противодействуют изменениям магнитного потока в кольце T. Поэтому поверхности соприкосновения щек экрана были тщательно амальгамированы. Хотя поверхность железа, вообще говоря, весьма плохо подвергается амальгамировке, но всё же это удалось выполнить благодаря принятию мер по очистке поверхности от следов окислов и по обнажению чистого железа. После амальгамирования щеки P и Q были плотно сложены с кольцом T внутри, и вновь была собрана схема, показанная на рис. 101. Во время произведенных затем опытов наблюденные величины $\Delta\Phi_1$ колебались в пределах от 1200 до 32 000, $\Delta\Phi_2$ — от 1 100 до от 12 400 и $\Delta\Phi_3$ — от 100 до 19 600 максвеллов. Общая сводка полученных результатов представлена на рис. 102 в виде кривых $\Delta\Phi_2$ и $\Delta\Phi_3$. По оси абсцисс отложены величины $\Delta\Phi_1$. Как видно из хода указанных кривых, при очень слабых возбуждениях первичной обмотки индуктивное действие, наблюдаемое во вторичной цепи и характеризуемое величиной $\Delta\Phi_2$, составляло значительную долю того, что было бы в случае отсутствия задерживающего железного экрана. По мере возрастания $\Delta\Phi_1$ отношение $\Delta\Phi_2 : \Delta\Phi_1$ непрерывно уменьшалось. При $\Delta\Phi_1 = 18\,400$ максвеллов $\Delta\Phi_2$ составляло 50% от Φ_1. При $\Delta\Phi_1 = 32\,000$ максвеллов $\Delta\Phi_2$ составляло только около 39% от $\Delta\Phi_1$. В этом последнем случае $\Delta\Phi_3$ по абсолютной величине составляло около 61% от $\Delta\Phi_1$. Иными словами, в этом случае 61% из числа магнитных линий, входящих в состав $\Delta\Phi_1$, утрачивало благодаря наличию железного экрана свою активность по отношению ко вторичной цепи.

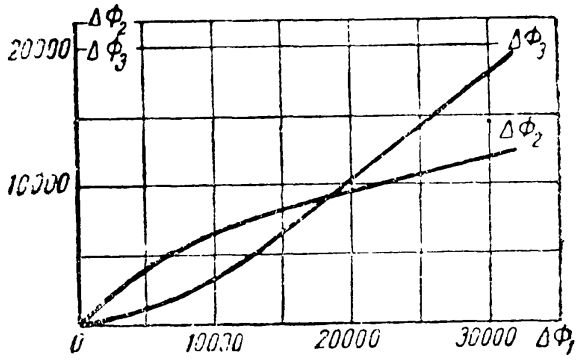


Рис. 102.

Во всех описываемых опытах при увеличении первичного потока Φ_1 железным экраном задерживались магнитные линии, имевшие направление, обратное потоку Φ_1, а при уменьшении этого первичного потока экран задерживал магнитные линии того же направления, что и направление потока Φ_1. Всё это находится в полном соответствии с представ-

лением о возникновении самостоятельных магнитных колец или звеньев, отделяющихся от первичного потока Φ_1 во время его структурных преобразований, подобных тем, которые были уже рассмотрены раньше и иллюстрированы, между прочим, рис. 88—90, 95—97 и 100. Если, далее, вдуматься в тот факт, что $\Delta\Phi_3$ и $\Delta\Phi_2$ численно всегда дополняют друг друга до величины $\Delta\Phi_1$, то вполне естественно сделать заключение, что индуктивный агент доходит от первичной обмотки до вторичной цепи именно в виде магнитных звеньев того же направления и вообще совершенно таких же, что и замкнутые магнитные линии, задерживаемые экраном в большей или меньшей степени. *Следовательно, в описанных опытах можно видеть подтверждение описанной выше схемы того, как протекает процесс электромагнитной индукции тока, т. е. как от внешнего магнитного потока отпочковываются магнитные звенья, нанизываемые на контур цепи, подвергающейся индуктивным воздействиям.*

в. Когда флюксметр был включен в цепь контрольной обмотки K (рис. 101) стрелка его быстро доходила до предельного положения, определяющего величину $\Delta\Phi_1$. Когда же флюксметр включался в цепь вторичной обмотки $S_1S_2S_3$, стрелка его двигалась сравнительно медленно. Как показало измерение соответствующих промежутков времени, во втором случае индуктивный эффект заканчивался в десятки раз медленнее, чем в первом. Так, например, были наблюдены промежутки времени порядка 0.1 сек. для установления $\Delta\Phi_1$ и около 2 сек. для окончательного установления $\Delta\Phi_2$. Надо еще иметь в виду, что $\Delta\Phi_1$ в среднем раза в два больше, чем $\Delta\Phi_2$. При встречном включении обмоток K и $S_1S_2S_3$ стрелка флюксметра сначала очень быстро идет вперед, заходит дальше, чем это соответствовало бы разности $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$, и затем после краткой остановки медленно ползет назад и останавливается в положении, как раз измеряющем $\Delta\Phi_3$, т. е. указанную разность между величинами $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$. Таким образом, при наличии железного экрана PQ индуктивное действие первичной цепи на вторичную задерживается не только количественно, но и во времени. Есть промежуток времени, когда приращение первичного потока $\Delta\Phi_1$ уже закончилось, но эффект этого приращения еще не дошел в окончательном виде до вторичной цепи. Отсюда заключаем, что физический агент, который осуществляет электромагнитную связь первичной цепи со вторичной и непосредственно участвует в переносе энергии от одной цепи к другой, временно задерживался железным экраном.

В дополнение к только что описанному опыту было проделано еще следующее. В цепь флюксметра был введен особый выключатель, при помощи которого эта цепь могла быть прерываема и или замыкаема в любой момент. Благодаря применению указанного выключателя флюксметр не регистрировал тех изменений в состоянии магнитной системы, которые происходили, пока цепь этого прибора была разомкнута. Когда цепь флюксметра замыкалась через 0.1 сек. после предварительного включения возбуждающей тороидальной обмотки рубильником L, то показания флюксметра оставались практически теми же, независимо от того, состояла ли его цепь из одной только вторичной обмотки $S_1S_2S_3$ или из включенных, как обычно, навстречу двух обмоток $S_1S_2S_3$ и K. В последнем случае присутствие обмотки K в цепи флюксметра не влияло на его показания. Флюксметр, приключаемый к контрольной обмотке K с запозданием в 0.1 сек., не обнаруживал никакого эффекта. Из всего этого вытекает, что физический агент, который возбуждает индуктированную электродвижущую силу в цепи флюксметра,

составленной из двух обмоток $S_1S_2S_3$ и K, действует сначала на обмотку K и затем, на 0.1 сек. позже, начинает действовать на обмотку $S_1S_2S_3$.

г. Наблюдения над разновременностью индуктивных эффектов, производимых одним и тем же магнитным потоком в различных частях электрической цепи, можно рассматривать в качестве прямого ответа на старый вопрос, который не раз бывал предметом дискуссии. Речь идет о том, является ли электродвижущая сила, индуктируемая в некоторой замкнутой проводящей цепи, строго локализованной в определенных частях этой цепи, или эта точка зрения не имеет достаточных физических оснований, и мы должны всегда иметь в виду всю замкнутую цепь, относя индуктированную электродвижущую силу к данной цепи как к единому целому. В описанных выше экспериментах удалось совершенно отчетливо разделить индуктивные эффекты, возникающие в различных частях одной и той же цепи, и таким образом доказать правильность первой точки зрения. Здесь необходимо напомнить, что указанная точка зрения, признающая локализацию индуктируемой электродвижущей силы в отдельных участках некоторой цепи, вполне соответствует воззрениям Фарадея, который постоянно говорил о „пересечении" магнитных линий каким-либо определенным участком цепи. Эта же точка зрения в полной мере соответствует и мнению Максвелла, высказанному по поводу случаев, имеющих непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу.[1]

д. В некоторых экспериментах была сделана попытка выяснить общие условия, характеризующие процесс задерживания магнитных колец железным экраном. Было обследовано влияние скорости изменения главного магнитного потока в кольце T. С этой целью в цепь тороидальной катушки была включена специальная комбинация сопротивлений, позволявшая плавно и сколь угодно медленно изменять силу намагничивающего тока в пределах от нуля до известного наибольшего значения. Оказалось, что если время, потребное для этого, было достаточно велико, например одна минута или более, то железный экран практически не задерживал магнитных колец, и они беспрепятственно проходили сквозь него, производя во вторичной обмотке $S_1S_2S_3$ тот же индуктивный эффект, что и в контрольной обмотке K. Это, надо думать, объясняется тем, что железный экран PQ оказывается неспособным окончательно задержать больше кольцевых магнитных линий, чем максимальное их количество, находившееся в нем в некоторый момент времени. При очень медленном протекании преобразований магнитного потока, сопровождающих намагничивание железного кольца T, также с очень малою скоростью происходит и образование самостоятельных магнитных колец, входящих в экран PQ за некоторый промежуток времени в пренебрежимо малом количестве и в данном случае не накапливающихся в нем. Совсем иначе, повидимому, обстоит дело при быстром возникновении главного магнитного потока. Здесь сразу же в большом количестве отделяются магнитные звенья, которые сначала скопляются в промежутке между кольцом T и внутренней поверхностью экрана PQ, затем проникают в экран, сравнительно сильно его намагничивая и в значительной степени задерживаясь в нем благодаря свойствам железа, а далее лишь частично выходят из него и нанизываются на контур вторичной цепи.

е. Наконец, был произведен опыт принудительного удаления магнитных колец, задержанных железным экраном PQ в случае быстрого установления тока, намагничивающего кольцо T. Сначала было испробо-

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 534.

вано действие чисто механических сотрясений экрана, вызываемых многократными ударами стального молотка по его поверхности. В виду того, что это не привело к достаточно удовлетворительным результатам, был затем применен метод „магнитных сотрясений". С этой целью на наружную цилиндрическую поверхность экрана была наложена дополнительная катушка, состоявшая из 34 витков проволоки подходящего сечения. Через дополнительную катушку пропускался постоянный ток в 50 А, направление которого переключалось на обратное до 100 раз в минуту. Так как необходимо было совершенно исключить индуктивное действие этого тока на цепь флюксметра, обмотка $S_1 S_2 S_3$ тщательно устанавливалась в положении, при котором был равен нулю коэффициент взаимной индукции указанной обмотки и дополнительной катушки, наложенной на экран PQ. При таких условиях переключения тока в наружной дополнительной катушке сами по себе не оказывали никакого влияния на показания флюксметра. Как и ожидалось, переменное поперечное намагничивание железного экрана, задерживавшего магнитные кольца, сопровождалось освобождением части подобных колец. Это было обнаруживаемо по соответствующему отклонению флюксметра, помещенного в цепь обмотки $S_1 S_2 S_3$. Если количество магнитных колец, задержанных экраном PQ, было велико, то не удавалось полностью удалить их из экрана, повидимому, вследствие недостаточной интенсивности магнитных сотрясений. Но в случаях, когда железным экраном было задержано сравнительно небольшое количество магнитных колец (например, порядка одной тысячи максвеллов), применявшимися магнитными сотрясениями можно было освободить из экрана практически весь удерживаемый им магнитный поток. Иными словами, после этих сотрясений отклонение стрелки флюксметра оказывалось соответствующим разности величин $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$.

Таким образом, был констатирован сам по себе весьма любопытный факт. Индуктивное воздействие на вторичную цепь $S_1 S_2 S_3$ со стороны первичной обмотки проявлялось не всё сразу. Частично оно обнаруживалось немедленно после возникновения в кольце T приращения магнитного потока $\Delta\Phi_1$. Но другая часть указанного индуктивного воздействия в потенциальном виде сохранялась неопределенно долгое время в экране PQ, как в некотором аккумуляторе своего рода. В любой момент, однако, нереализованная часть индуктивного воздействия могла быть использована путем извлечения магнитного потока $\Delta\Phi_3$ из хранившего его железного экрана.

Когда в кольце T (рис. 101) происходит приращение главного магнитного потока Φ_1, в замкнутом экране PQ возникают индуктированные токи, которые должны сопровождаться изменением магнитного состояния железа экрана. Исходя из этого, все явления, описанные в настоящем параграфе, конечно, можно формально объяснять с точки зрения индуктивных процессов, происходящих в толще экрана. Правда, в таком случае иногда потребуется более или менее сложное обследование вопроса, чтобы установить некоторые количественные соотношения, характеризующие рассмотренные явления (например, доказать, что $\Delta\Phi_3$ по своей абсолютной величине принципиально никогда не может быть больше $\Delta\Phi_1$ и т. п.). Однако не в этом дело. Даже великое открытие электромагнитной индукции, как показали последующие теоретические работы, можно было бы предвидеть и можно было бы предвычислить величину индуктивного эффекта, исходя из других закономерностей природы. Нет, вообще говоря, ничего особенно неожиданного в тех результатах, которые были получены при экспериментальном изучении

преобразований магнитного потока тороидальной обмотки, окруженной замкнутым железным экраном. Имеет значение лишь то обстоятельство, что всё, наблюдённое в вышеописанных опытах, и в качественном и в количественном отношении находится в полном согласии с фарадеевской идеей о физически существующих магнитных линиях. Этому именно вопросу о реальности магнитных линий и была, по существу, посвящена Глава I настоящей книги.

§ 38. Преобразования магнитного потока в трансформаторах переменного тока

а. После всего того, что было уже сказано вообще о преобразованиях магнитного потока, должны быть в значительной степени понятны магнитные процессы, происходящие в трансформаторах переменного тока. Однако в виду большого значения этого случая практических применений электромагнитной индукции весьма полезно особо остановиться на его рассмотрении.

Необходимо прежде всего констатировать, что до последнего времени приходится встречаться с ошибочными взглядами по вопросу о том, как ведет себя магнитный поток в трансформаторе. Даже среди электриков, работающих в области теоретической электротехники, довольно широко распространено мнение, что всё дело ограничивается периодическими изменениями магнитного потока, сцепляющегося с первичной и вторичной обмотками и проходящего через сердечник трансформатора (с учетом, конечно, обычного магнитного рассеяния). При этом просто предполагается, будто бы магнитный поток вовсе не претерпевает каких-либо пространственных перемещений, но остается на месте и именно в состоянии полной неподвижности периодически изменяет лишь свою величину, а также свое направление.

Указанные представления находятся, конечно, в ярко выраженном противоречии с основными установками Фарадея и Максвелла, с теми установками, соответствие которых действительной природе вещей подтверждается всей совокупностью достигнутых наукой и практикой результатов. В связи с этим целесообразно повторить здесь следующие слова Максвелла,[1] однажды уже цитированные в § 18 Главы III:

> „Представление о непрерывности силовых линий, к которому пришел Фарадей, исключает возможность внезапного появления их там, где их раньше не было ни одной. Если, следовательно, число линий, которые пронизывают проводящий контур, претерпевает изменение, то это может происходить только благодаря тому, что или контур движется поперек силовых линий, или силовые линии движутся поперек контура“.[2]

Эти именно соображения были приняты Максвеллом во внимание при выводе данной им формулировки закона электромагнитной индукции. Вся максвелловская теория электромагнитного поля, таким образом, в своих истоках связана с идеей о движении физических реальностей, которые определяют собой проявления магнитного состояния какой-либо среды.

---

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 541.

[2] Как было уже указано в примечании к § 18, в данном случае термином „силовая линия“ Максвелл обозначает то, что Фарадей назвал „физической силовой линией“ магнитного поля, имея в виду реально существующую нитеобразную составляющую магнитного потока. Мы называем это „магнитной линией“.

Итак, магнитные процессы, происходящие в трансформаторах переменного тока, мы должны по существу рассматривать с точки зрения пространственных перемещений магнитного потока, который в основном распространяется от первичной обмотки. При возникновении тока в ней магнитный поток развивается в окружающем пространстве, входит в железный сердечник и достигает там некоторой максимальной величины. Затем он убывает в соответствии с периодическими изменениями первичного и вторичного тока, когда магнитные линии начинают обратно двигаться. Далее поток развивается до максимума в противоположном направлении, опять-таки в связи с движением магнитных линий в пространстве, снова убывает и т. д. Во время описываемых перемещений магнитных линий они будут „пересекаться" витками вторичной обмотки, в которой индуктируется ток путем нанизывания на ее контур магнитных звеньев, отпочковывающихся в процессе преобразований магнитного потока.

б. Вообще говоря, в трансформаторах переменного тока мы встречаемся с более усложненной формой того же, что происходит в элементарном случае взаимной индукции тока, когда параллельно одному проводнику с изменяющимся током расположен второй проводник, входящий в состав некоторой замкнутой цепи.

В § 35 мы уже говорили о том, что процесс возникновения или исчезновения магнитного поля тока необходимо, согласно Фарадею, рассматривать как распространение кольцевых магнитных линий в радиальном направлении от проводника с усиливающимся током или как их сокращение к проводнику с ослабевающим током. На рис. 103 представлена схема структурных преобразований какой-либо одной магнитной линии, распространяющейся в окружающем проводник *I* пространстве при усилении тока в нем. Проводник *II*, перпендикулярный плоскости чертежа, так же как и проводник *I* (оба изображены в сечении), будет при этом „пересекать" магнитную линию *a*, движущуюся в направлении, показанном стрелками. Иными словами, магнитная линия *a* в своем стремлении обойти проводник *II* начнет деформироваться (стадия *A*), некоторой своей частью окружит этот проводник (стадия *B*) и претерпит отпочкование от нее магнитного звена *b*, нанизываемого на проводник *II* (стадия *C*). Направление усиливающегося в проводнике *I* тока и направление тока, индуктируемого в проводнике *II*, указано соответствующими значками (крестик и точка). На рис. 104 представлена схема обратного преобразования магнитной линии при убывании тока в проводнике *I*, к которому эта магнитная линия теперь стягивается, как показано стрелками. Сокращающаяся магнитная линия *a*, обходя проводник *II*, сначала немного деформируется (стадия *A*), затем это деформирование доходит до состояния, непосредственно предшествующего контакту противоположно направленных участков данной магнитной линии (стадия *B*), и процесс структурного преобразования заканчивается отпочкованием магнитного звена *b*, нанизывающегося на проводник *II* (стадия *C*). Направление индуктированного в проводнике *II* тока получается теперь такое же, как и направление ослабевающего тока в проводнике *I*. Следовательно, в данном случае направление индуктированного тока будет обратное тому, что имело место при усилении тока в проводнике *I* (рис. 103).

в. Рассмотрим теперь вкратце общий ход преобразований магнитного потока, происходящих в трансформаторе переменного тока. Допустим, что главный магнитный поток трансформатора создается в основном первичными ампервитками. На рис. 105 представлены в очень схематическом виде последовательные стадии преобразований, претерпеваемых

отдельными магнитными линиями главного потока в случае усиления первичного тока. При этом, ради упрощения картины преобразований, изображено очень незначительное количество витков первичной и вторичной обмоток (*I* и *II*). Магнитные линии *1* и *1'* образовались в результате сращивания магнитных звеньев, сцеплявшихся ранее каждое лишь с одним витком первичной обмотки и сливающихся в единый контур подобно тому, как это было описано в § 26 для случая двух витков (рис. 37). Эти магнитные линии *1* и *1'* по мере увеличения силы тока, который протекает по первичной обмотке, будут от нее распространяться в окружающее пространство, частично входя в железный сердечник и стремясь проникнуть сквозь вторичную обмотку *II* вследствие бокового распора в системе магнитных линий, показанных на рис. 105 лишь

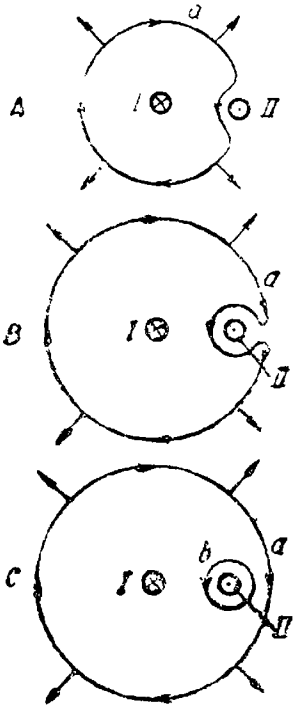


Рис. 103.

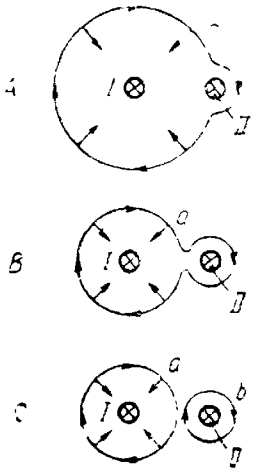


Рис. 104.

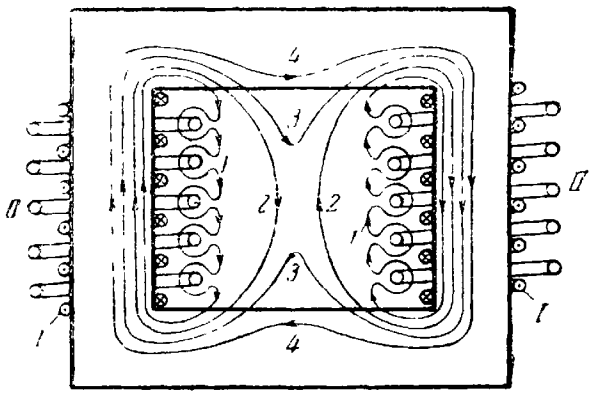


Рис. 105.

в ограниченном числе. В связи с указанным стремлением произойдет сильное деформирование магнитных линий *1* и *1'* с последующим отпочкованием от них магнитных звеньев, нанизываемых на вторичные витки, и образование контуров, подобных магнитным линиям *2* и *2'*, которые уже прошли стадию отпочкования магнитных звеньев.

Дальнейшее преобразование магнитных линий *2* и *2'* будет состоять в их сращивании после контакта противоположно направленных ближайших участков. Получится единый контур, как и магнитной линии *3*, отчасти еще проходящей через воздух, но направляющейся в железный сердечник. Магнитная линия *4* предварительно подверглась всем описанным стадиям преобразования и уже полностью вошла в железо.

Обратные пространственные перемещения магнитных линий будут иметь место при убывании магнитного потока в железном сердечнике. Вместе с тем магнитные линии подвергнутся в общем обратным же преобразованиям благодаря их стремлению сократиться в направлении витков первичной и вторичной обмоток. При этом магнитные линии, всеми своими частями проходящие по железу, подобно линии *4*, начнут под влиянием бокового распора выходить из железного сердечника наружу, принимая форму магнитной линии *3*. После контакта сблизившихся

противоположно направленных участков магнитная линия 3 разделится на обособленные контуры 2 и 2', которые в свою очередь, продолжая сокращаться, разобьются на магнитные звенья, нанизываемые на витки обмоток трансформатора.

г. По поводу процесса электромагнитной индукции, протекающего в трансформаторах переменного тока, иногда высказывается следующее мнение, в котором во всяком случае принято во внимание то обстоятельство, что „действие на расстоянии" есть псевдофизическое представление, уже отжившее свое время. Не разделяя фарадее-максвелловской установки относительно пространственных перемещений магнитных линий при протекании электромагнитных процессов вообще, предполагают, что количественные изменения неподвижного магнитного потока в трансформаторе сопровождаются распространением в окружающем пространстве некоторых специфических волн, доходящих до обмоток трансформатора и обусловливающих возникновение в них индуктированных электродвижущих сил. С этой точки зрения, чтобы быть последовательным, необходимо, конечно, допустить также, что подобного рода волны исходят и от первоисточника всех изменений в трансформаторной системе, т. е. от ее первичной обмотки, и что в железном сердечнике трансформатора указанные волны как-то претворяются в главный магнитный поток, который, например, будет непрерывно накапливаться в сердечнике даже в том случае, если первичный ток возрастает с постоянной сколь угодно малой скоростью. Гораздо целесообразнее и, конечно, правильнее описывать электромагнитные явления в трансформаторах, пользуясь представлением, введенным в науку Фарадеем, т. е. представлением о движении реально существующих магнитных линий. Пытаясь же рассматривать происходящие в этом случае явления с точки зрения распространения каких-то специфических волн, мы сильно разойдемся с четко выраженной фарадее-максвелловской установкой.

д. Из всего того, что было здесь сказано о преобразованиях магнитного потока в трансформаторах переменного тока, отнюдь не вытекает, будто бы рекомендуется как-либо изменить принятую в настоящее время общую методику расчета трансформаторов. Поскольку мы интересуемся результирующим индуктивным эффектом периодических изменений магнитного потока, конечно, следует пользоваться при подобных расчетах весьма удобной в данном случае второй (максвелловской) формулировкой закона электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

как это всегда и делается.

Необходимо, однако, помнить, что эта общая формулировка не касается деталей магнитных процессов происходящих в трансформаторе. В обычных условиях вполне допустимо игнорирование многих подробностей того, что происходит в трансформаторе. Но при рассмотрении некоторых случаев ненормальных режимов работы трансформатора может оказаться небесполезным более или менее полный учет всех обстоятельств, сопровождающих преобразования магнитного потока.

§ 39. Нормальная и аномальная составляющие потока и электродвижущей силы взаимной индукции

Во всяком процессе преобразований магнитного потока мы обычно встречаемся с некоторыми особыми условиями, которые в основном характеризуются пространственным перемещением магнитных линий,

иногда имеющих форму совершенно обособленных контуров. Такого рода магнитные линии или их отдельные участки, явившиеся результатом преобразований магнитного потока, могут накладываться на нормальное распределение магнитных линий, соответствующее неизменному состоянию системы.

В пояснение сказанного рассмотрим случай, представленный на рис. 106. Здесь изображен некоторый кольцевой сердечник с наложенной на него первичной обмоткой *I*, по которой проходит ток i_1. Допустим, что вторичная цепь состоит из одного витка *II*. При неизменности геометрических координат системы и при условии

$$i_1 = \text{Const.}$$

виток *II* будет охватывать магнитный поток, который можно назвать нормальным магнитным потоком взаимной индукции. Обозначим его через Φ_n. Этот поток, вообще говоря, пропорционален току i_1, т. е.

$$\Phi_n = Mi_1,$$

где M есть нормальный коэффициент взаимной индукции первичной и вторичной цепей. Магнитный поток Φ_n слагается из потока в кольце-

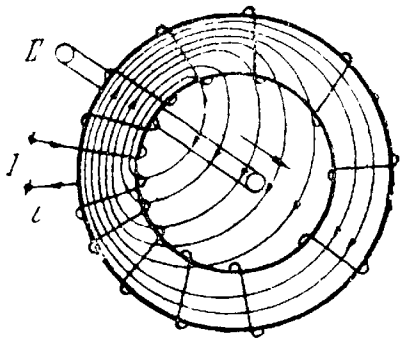


Рис. 106.

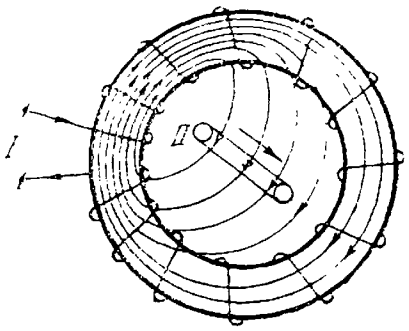


Рис. 107.

вом сердечнике и из обычного потока рассеяния, который практически всегда имеет место. Этот поток рассеяния на рис. 106 не показан, чтобы не усложнять общей картины. В просвете же кольца изображены перебегающие в направлении стрелки магнитные линии, порождаемые в процессе преобразований магнитного потока в случае усиления тока i_1, т. е. когда

$$\frac{di_1}{dt} > 0.$$

Эти добавочные магнитные линии, не учитываемые при обычном рассмотрении закономерностей, которым подчиняются процессы в электромагнитных системах, в совокупности составляют то, что можно назвать *аномальным магнитным потоком*.[1] Скорость, с которою перемещаются в пространстве аномальные магнитные линии, конечно, равна скорости

[1] Здесь необходимо отметить, что еще в 1890 г. французский ученый Вашн указывал, что в пространстве вокруг тороидальной обмотки во время прохождения по ней изменяющегося электрического тока должен появляться обычно не учитываемый добавочный магнитный поток, который мы и назвали аномальным. (A. Vaschy. Traité d'Electricité et de Magnétisme, 1890, vol. I, p. 345).

света, когда они совершенно свободны и предоставлены самим себе. Однако, если например в случае, представленном на рис. 106, применен железный сердечник, эта скорость может быть значительно меньше, так как здесь аномальные магнитные линии в местах перехода из воздуха в сердечник связаны с процессом изменения магнитного состояния железа. Повидимому, в данном случае происходит нечто подобное тому, что имеет место при переносном движении какого-либо магнита вместе с его полем.

Сколь бы велика ни была скорость распространения аномальных магнитных линий, одно несомненно, а именно, что густота их распределения в пространстве будет тем больше, чем больше скорость протекания преобразований магнитного потока, т. е. чем больше величина производной по времени от первичного тока i_1. Обозначая через Φ_a аномальный магнитный поток, охватываемый витком *II*, и принимая во внимание, что поток Φ_a должен еще зависеть от скорости движения аномальных магнитных линий (v), а также от геометрических координат рассматриваемой системы (g_1, g_2, ...), можем, следовательно, написать

$$\Phi_a = f\left(\frac{di_1}{dt},\ v,\ g_1,\ g_2, \ldots\right),$$

причем в состав этой функции во всяком случае входит член, прямо пропорциональный величине

$$\frac{di_1}{dt}.$$

Совершенно то же можно сказать и о магнитном потоке Φ_2, охватываемом витком *II*, полностью расположенным в просвете кольца с обмоткой (рис. 107). Разница по сравнению с предыдущим случаем лишь та, что здесь виток *II* не сцепляется с основным магнитным потоком тороидальной обмотки *I*. В данном случае сквозь виток *II*, кроме аномального магнитного потока Φ_a, проходит только поток рассеяния Φ_n, прямо пропорциональный первичному току i_1. Этот поток Φ_n опять-таки не показан на рисунке.

Вообще всегда магнитный поток взаимной индукции, сцепляющийся с некоторою вторичною цепью, в самом общем виде выражается так:

$$\Phi_2 = \Phi_n + \Phi_a = Mi_1 + f\left(\frac{di_1}{dt},\ v,\ g_1,\ g_2, \ldots\right).$$

В обычных условиях аномальная составляющая магнитного потока сравнительно очень незначительна, так что практически ею можно пренебречь. Но в некоторых случаях, и в особенности при достаточно высоких частотах, проявления аномального магнитного потока становятся вполне заметными.

В связи с наличием аномальной составляющей потока взаимной индукции и выражение для электродвижущей силы взаимной индукции дополняется членом, в котором появляется вторая производная первичного тока i_1 по времени. Вообще можем написать

$$e_2 = e_{2r} + e_{2a} = -\frac{d(Mi_1)}{dt} - \frac{d\Phi_a}{dt},$$

где

$$e_{2n} = -\frac{d(Mi_1)}{dt},$$

$$e_{2a} = -\frac{d\Phi_a}{dt}.$$

При этом e_{2a} будет тем больше, чем больше величина

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2}.$$

В технике переменных токов нормальных низких частот совершенно не приходится считаться со второй (аномальной) составляющей электродвижущей силы взаимной индукции и, собственно говоря, ее трудно обнаружить. Но при высоких частотах величина $\frac{d^2 i_1}{dt^2}$ может получить такие значения, при которых оказывается весьма ощутимой аномальная составляющая индуктируемой электродвижущей силы, т. е.

$$e_{2a} = -\frac{d\Phi_a}{dt}.$$

§ 40. Преобразования магнитного потока тороидальной обмотки, окруженной разомкнутым железным экраном

а. С целью экспериментального обследования аномального магнитного потока, о котором говорилось в § 39, было применено общее расположение частей схемы, представленное на рис. 108.[1] Здесь *TT* есть кольцевой сердечник, выточенный из дерева. Средний диаметр кольца был равен 10 см. Площадь поперечного сечения сердечника составляла 2.7 см^2. На этот сердечник была возможно равномернее наложена тороидальная обмотка из 120 витков проволоки с очень высокой изоляцией, образованной двумя слоями резины. Пробивное напряжение такой изоляции достигало 15 000 вольт. Проводник имел поперечное сечение в 0.5 мм^2. *M* и *N* — концы указанной тороидальной обмотки. Сердечник с обмоткой помещался внутри массивного железного кожуха или экрана *PQ*, подобного изображенному на рис. 101 и применявшемуся в опытах с замкнутым железным экраном. Но только в данном случае со стороны центрального проходного отверстия (центральной камеры) между обеими половинами экрана *P* и *Q* всегда оставлялась узкая щель, просвет которой изменялся в зависимости от обстоятельств при помощи металлических кольцевых прокладок разной толщины, помещавшихся между внешними частями щек *P* и *Q*. Эти прокладки не изображены на рис. 108. В толще щек *P* и *Q* были сделаны глубокие цилиндрические выемки Y_1 Y_2. Назначение их, а также некоторых частей схемы будет выяснено дальше.

При прохождении через тороидальную обмотку изменяющегося электрического тока будут происходить соответствующие преобразования магнитного потока, и аномальные магнитные линии должны проникать сквозь щель в центральную камеру, где и могут быть подвергнуты специальному обследованию. Действие же нормального магнитного

[1] Описываемые ниже опыты были произведены мною в 1928 и 1929 гг.
В. Миткевич

потока рассеяния будет в значительной степени ослаблено благодаря наличию экрана PQ.

Совершенно очевидно, что аномальный магнитный поток, проникающий в центральную камеру, и ожидаемые проявления этого потока будут тем больше, чем больше скорость изменения тока в тороидальной обмотке. Ввиду этого через обмотку пропускался ток высокой частоты (около 10^6 герцев). Это же было причиной применения деревянной основы для тороидальной обмотки вместо железного сердечника, с которым производились опыты, описанные в § 37. Конечно, незатухающие электрические колебания наилучшим образом соответствовали бы целям исследования. Однако обстановка позволила воспользоваться только затухающими колебаниями. Эти колебания генерировались при посредстве устройства с разрядником Вина.

В условиях опыта, в общих чертах показанных на рис. 108, необходимо было предполагать, что аномальный магнитный поток, проникающий свозь щель в центральную камеру экрана PQ, может быть

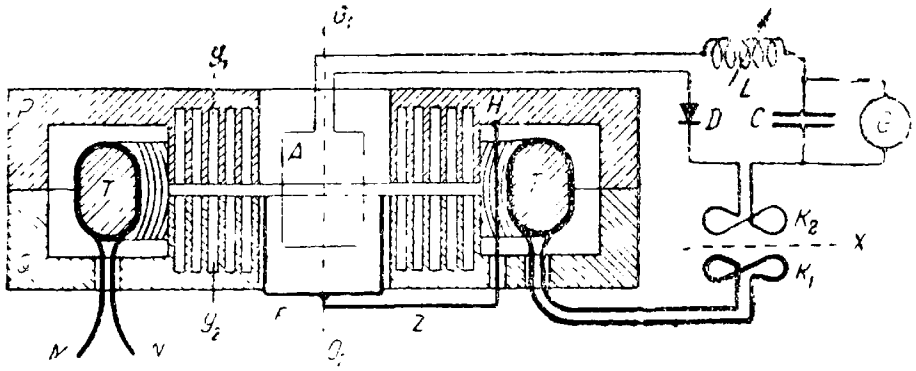


Рис. 108.

двух видов. Действительно, сквозь щель должны проходить, во-первых аномальные магнитные линии, возникшие в процессе преобразований главного магнитного потока и перебегающие через центральную камеру поперек линии O_1O_2. С другой же стороны, хотя тороидальная обмотка не была совершенно равномерной и вся система не была вполне строго симметричной, всё же возможно было ожидать возникновения некоторого количества аномальных магнитных колец, так как экран PQ в известной степени должен был затруднять движение перебегающих магнитных линий и тем самым способствовать отделению от них самостоятельных магнитных колец (звеньев). Таким образом, в центральной камере мог появляться аномальный магнитный поток как в форме магнитных линий, перебегающих поперек оси симметрии O_1O_2, так и в форме свободных магнитных колец. Соотношение между количествами тех и других зависело от величины просвета щели и, кроме того, от наличия более или менее значительных препятствий на пути перебегающих магнитных линий.

б. При обследовании аномального магнитного потока в объеме центральной камеры экрана PQ была прежде всего сделана попытка воспользоваться магнитным детектором, подобным известному магнитному детектору Маркони. Был изготовлен цилиндрический сердечник из свернутых в трубку длинных листков высококачественного железа, имевших толщину в 0.05 мм. Длина этого цилиндрического сердечника равнялась 60 мм, наружный диаметр 31 мм, внутренний 23 мм. Поверх железного сердечника была более или менее равномерно наложена

обмотка из 4200 витков изолированной проволоки в 0.1 мм диаметром. Цепь образованной таким образом обмотки замыкалась через флюксметр, по отклонениям которого можно было заметить изменения магнитного потока в железном сердечнике детектора. Кроме указанной обмотки, на тот же сердечник было наложено еще 205 витков изолированной проволоки в 0.5 мм диаметром. Всякий раз перед использованием магнитного детектора цепь флюксметра прерывалась, и по обмотке из более толстой проволоки пропускался постоянный ток, после прекращения которого железный сердечник сохранял некоторое остаточное намагничение. Во время опытов магнитный детектор располагался в цилиндрической камере экрана PQ симметрично по отношению к щели, так что выходящие из нее аномальные магнитные линии должны были встречать на своем пути железный сердечник. Ось же детектора совпадала с линией O_1O_2 (рис. 108). Предполагалось, что аномальные магнитные линии, бегущие в переменном направлении поперек линии O_1O_2 во время возбуждения тороидальной обмотки высокочастотным током, могут проникать в очень тонкие железные листки, из которых состоял сердечник детектора. Эффект подобного добавочного перемагничивания железного сердечника должен быть таким же, как и у „магнитных сотрясений" в описанных раньше опытах с замкнутым железным экраном (§ 37). Магнитные сотрясения должны способствовать размагничению сердечника, т. е. ослаблению его остаточного намагничения. И это должно было отмечаться флюксметром. Что касается свободных магнитных звеньев, которые могли появляться в центральной камере, то в отношении их не ожидалось никакого размагничивающего эффекта, так как они были способны, скользя по поверхности железного сердечника детектора и не проникая внутрь его, разбегаться в разные стороны.

Первые же наблюдения, произведенные с магнитным детектором, выяснили наличие вредных влияний со стороны токов, индуктируемых нормальным потоком рассеяния тороидальной обмотки на внутренних поверхностях щек экрана P и Q. Распространяясь по поверхностям, ограничивающим щель, эти наведенные токи доходят до цилиндрической поверхности центральной камеры и влияют на магнитное состояние сердечника детектора, производя в нем тот же размагничивающий эффект, который ожидался со стороны аномального магнитного потока. С целью возможно более полного устранения мешающих действий, обусловленных указанными наведенными токами, в щеках P и Q на поверхностях, которыми ограничена щель, были проточены глубокие цилиндрические впадины Y_1Y_2 (рис. 108), первоначально отсутствовавшие. Ширина каждой такой впадины была около 2 мм, а глубина около 34 мм. Число этих впадин окончательно было доведено до восьми (на рисунке их показано только пять). Благодаря наличию описанных впадин путь, который должны были пройти наведенные поверхностные токи изнутри экрана PQ до центральной камеры, сильно увеличивался и несколько превышал 500 мм. Таким образом, вредное действие поверхностных токов на магнитный детектор практически исключалось.

Во избежание непосредственного действия на цепь магнитного детектора и флюксметра со стороны электромагнитных излучений высокочастотного генератора вся эта цепь экранировалась специальными металлическими оболочками.

Произведенные затем опыты по обнаружению аномального магнитного потока, проникающего в центральную камеру, дали следующие результаты. Когда, после предварительного намагничения сердечника детектора постоянным током, через тороидальную обмотку пропускался ток высокой

частоты, сила которого доходила до 5А (измерение производилось при помощи теплового амперметра), то при ширине щели в 4 мм наблюдалось отклонение стрелки флюксметра, равное 3 делениям шкалы. При ширине щели в 1.8 мм получалось отклонение около 1.2 деления и, наконец, при ширине щели в 0.3 мм отклонение было равно 0.6 деления. Надо полагать, что наблюдавшееся уменьшение искомого эффекта по мере уменьшения просвета щели было в основном связано с соответствующим возрастанием доли, приходившейся на свободные магнитные звенья в общем составе аномального магнитного потока. Сравнительно небольшие отклонения флюксметра в значительной степени зависели от того, что применялся прибор невысокой чувствительности и без зеркального отсчета. Тем не менее показания флюксметра были вполне достоверны и многократно повторялись.

Так как в описываемых опытах можно было подозревать, что на магнитный детектор действует всё же и какая-то доля нормального потока рассеяния, возникавшего вокруг тороидальной обмотки и сквозь щель проникавшего в центральную камеру с детектором, то было предпринято специальное обследование для определения вероятной величины такого эффекта. С этой целью, вместо деревянного сердечника TT с равномерно наложенной тороидальной обмоткой внутри экрана PQ, помещались другие сердечники с весьма неравномерной и даже с наложенной лишь на части сердечника обмоткой. Выяснилось, что наличие железного экрана с узкой щелью между щеками P и Q само по себе сильно уменьшало вредное действие потока рассеяния. Были приняты также во внимание еще возможные иные источники погрешностей, как, например, влияние на детектор переменного электрического поля, возникавшего в цилиндрической камере между верхней и нижней ее частями. Учитывая все указанные обстоятельства, можно было оценить вероятную ошибку в опытах с магнитным детектором никак не более чем в 30% от наблюденных отклонений флюксметра. Это заключение вполне согласуется с результатами дальнейших наблюдений индуктивного эффекта, производимого аномальным магнитным потоком.

Таким образом, применение магнитного детектора позволило совершенно определенно обнаружить эффект, который можно приписать только наличию аномальной составляющей магнитного потока, возникающей при прохождении высокочастотного тока через тороидальную обмотку.

в. Было желательно испытать и другие возможные методы для обследования аномального магнитного потока, проникающего в центральную камеру экрана PQ. С этой целью в камеру вводилась специальная катушка и изучался индуктивный эффект, производимый в ней аномальным магнитным потоком. На рис. 108 представлена общая схема именно этих экспериментов. Здесь A есть упомянутая специальная катушка, которая могла поворачиваться вокруг оси O_1O_2 и устанавливаться в любом необходимом положении. Катушка A входила в цепь, содержавшую обычный кристаллический детектор D, переменную индуктивность L, конденсатор C, шунтировавший гальванометр G, и катушка K_2. Переменная индуктивность L служила для настройки цепи детектора. Катушка K_2 имела форму восьмерки и была расположена параллельно катушке K_1, которая имела такую же форму и была введена в первичную цепь, т. е. в цепь тороидальной обмотки, наложенной на сердечник TT. Ток высокой частоты, протекавший по тороидальной обмотке, проходил также и через катушку K_1. Благодаря этому было возможно генерировать в катушке K_2 некоторую нормальную электродвижущую силу взаимной

индукции, величина которой регулировалась поворачиванием катушки K_1 вокруг оси симметрии. Вся цепь детектора D и катушки A предохранялась от непосредственного воздействия электромагнитных излучений при помощи металлической оболочки, на рис. 108 не показанной. В этой оболочке было проделано отверстие для отсчета показаний гальванометра и кроме того оболочка была снабжена круглым вырезом, покрытым густой сеткой X из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки, одним концом присоединявшейся к металлической оболочке. По обе стороны сетки X располагались плоские катушки K_1 и K_2, параллельно одна другой. Как было только что отмечено, сетка X была изготовлена так, что в ней не образовывалось никаких замкнутых контуров. Назначение этой сетки состояло в предохранении катушки K_2 от электрических влияний со стороны катушки K_1. В то же время сетка X не препятствовала магнитному полю катушки K_1 действовать на катушку K_2 и возбуждать в ней нормальную электродвижущую силу взаимной индукции. F представляет собою полый металлический цилиндр, закрытый снизу и изолированный от нижней половины экрана Q. При посредстве провода Z цилиндр F присоединялся в точке H к верхней половине экрана P. Всё это делалось для того, чтобы по возможности защитить катушку A от переменного электрического поля, возникавшего в центральной камере экрана PQ. Особым обследованием подтвердилась целесообразность применения указанного предохранительного цилиндра F.

Колебательная цепь, в которую была введена тороидальная обмотка, была выполнена симметрично по отношению к этой обмотке. Емкость данной цепи была разделена на две равные части, присоединенные к концам обмотки M и N. Для введения в колебательную цепь катушки K_1 тороидальная обмотка была разрезана на середине. Образовавшиеся концы соединялись с катушкой K_1.

При помощи катушки K_1 оказывалось возможным разложить полную электродвижущую силу, индуктируемую в катушке A, на две составляющие. Первая составляющая есть *нормальная* электродвижущая сила взаимной индукции, возникающая благодаря слабому потоку рассеяния тороидальной катушки, который, несмотря на экранировку был всё же в состоянии проникать в незначительной степени сквозь щель в центральную камеру, где находилась катушка A. Эта составляющая всей электродвижущей силы могла компенсироваться индуктивным действием катушки K_1 на катушку K_2 при их надлежащем взаимном расположении. Вторая составляющая есть *аномальная* электродвижущая сила взаимной индукции, обязанная своим появлением вхождению в центральную камеру аномальных магнитных линий. Указанная аномальная электродвижущая сила в основном определяется второй производной по времени от первичного тока i_1, протекающего через тороидальную катушку, и не может быть полностью скомпенсирована какой бы то ни было установкой катушек K_1 и K_2. Необходимо еще отметить, что перед каждым наблюдением катушки K_1 и K_2 всегда скрещивались, т. е. устанавливались в такое положение, при котором электродвижущая сила их взаимной индукции равнялась нулю.

Опыты с описанным расположением приборов подтвердили вышеизложенные соображения относительно аномальной электродвижущей силы, индуктируемой в катушке A. Была, например, применена катушка A, состоявшая из 32 витков в форме прямоугольника размером в 30 на 50 мм. Через тороидальную катушку пропускался колебательный ток силою в 2А (по тепловому амперметру). При ширине щели в 0.3 мм при надлежащей ориентировке катушки A (позиция I) наблюдалось

максимальное отклонение гальванометра, равное 43 делениям шкалы. Когда затем нормальная составляющая электродвижущей силы была скомпенсирована при помощи катушек K_1 и K_2, отклонение гальванометра уменьшилось до 37 делений шкалы. После этого катушка A поворачивалась вокруг оси O_1 O_2 для определения минимума отклонения. При повороте на 105° (позиция *II*) был найден этот минимум. Он оказался равным 1.2 деления шкалы гальванометра. Это отклонение не могло быть уменьшено каким-либо изменением относительного расположения катушек K_1 и K_2.

Было полное основание предполагать, что наблюденный индуктивный эффект в катушке A производился главным образом аномальными магнитными линиями, перебегавшими в центральной камере поперек линии O_1 O_2. В то же время естественно возникал вопрос, почему для перехода от максимума к минимуму отклонений гальванометра необходимо было повернуть катушку A не на 90°, а на 105°. Казалось бы, позиции *I* и *II* должны были различаться углом в 90°.

То обстоятельство, что в позиции *II* минимальное отклонение (1.2 деления шкалы гальванометра) не могло быть еще уменьшено поворотом катушки K_1 и как-либо скомпенсировано соответствующим подбором обусловленной этой катушкой нормальной электродвижущей силы взаимной индукции, свидетельствовало о следующем. Очевидно, в данной позиции поток обычного магнитного рассеяния, могущий проникать через щель, был параллелен плоскости катушки A. Отсюда вытекает, что для получения наибольшего индуктивного эффекта от потока рассеяния необходимо было бы повернуть катушку A вокруг оси O_1 O_2 на 90°, т. е. не дойти на 15° до позиции *I*. Сам по себе этот нормальный эффект, видимо, был невелик. Ведь в позиции *I* максимальное отклонение в 43 деления шкалы оказывалось возможным уменьшить лишь на 6 делений надлежащим подбором положения катушки K_1. Необходимо предположить, что перебегающие магнитные линии аномального потока не были параллельны магнитным линиям потока рассеяния, а составляли с ними некоторый угол порядка 20°, и именно эти перебегающие аномальные магнитные линии обусловливали в позиции *I* максимум отклонения гальванометра, сохранявшийся и после осуществления компенсации катушкой K_1.

Что касается углового различия между позициями *I* и *II* в 105°, то для объяснения его приходится допустить, что аномальный магнитный поток, который проникал в центральную камеру, отчасти состоял из определенного количества магнитных колец, возникавших благодаря наличию экрана PQ. При очень узкой щели такой экран должен был представлять собою значительную преграду для аномальных магнитных линий, стремившихся пробегать через щель. Вследствие происходящего в связи с этим сильного их деформирования от них могли отпочковываться магнитные кольца (рис. 100), которые затем сокращались и сквозь щель также входили в центральную камеру. В случае абсолютно симметричного расположения всего рассматриваемого устройства относительно оси O_1 O_2 (рис. 108) магнитные кольца, конечно, не должны были бы вызывать никакого результирующего индуктивного эффекта в катушке A. При их сокращении они одновременно пересекались бы вертикальными участками витков этой катушки, расположенными по обе стороны оси O_1 O_2, и получались бы два равных и прямо противоположных импульса индуктированной электродвижущей силы. Так как, однако, указанная симметрия практически была лишь приблизительной и так как расстояния вертикальных частей катушки A от оси O_1O_2 были, повиди-

мому, не вполне одинаковыми, то магнитные кольца могли оказываться сцепившимися с витками катушки A и могли обусловить в ней некоторый индуктивный эффект, хотя, быть может, и незначительный, но всё же заметный. Надо полагать, таким образом, что индуктивный эффект от аномальных магнитных колец налагался на индуктивный эффект от перебегающих аномальных магнитных линий. Вместе с тем необходимо принять во внимание, что ориентировки катушки A, наиболее благоприятствующие проявлению каждого из указанных эффектов в отдельности, могли быть, вообще говоря, не тождественными и даже мало связанными одна с другой. Одновременное существование обоих аномальных индуктивных эффектов, повидимому, и обусловливало фактически наблюдавшееся угловое различие в 105° между поворотами катушки A, соответствующими позициям I и II, т. е. максимуму и минимуму суммарного индуктивного эффекта. Если бы аномальные магнитные кольца отсутствовали, этот угол должен был бы равняться 90°, и минимальный индуктивный эффект в позиции II был бы равен нулю.

Для того чтобы отчетливее наблюдать проявления аномальных магнитных колец и совершенно устранить возможные вредные влияния следов нормального потока рассеяния, в дальнейших опытах применялись полые железные цилиндры, изготовленные из листового железа толщиною в 0.6 мм. Диаметр этих цилиндров последовательно увеличивался, и их можно было вводить в несколько рядом расположенных цилиндрических впадин Y_1 Y_2 (приподняв, конечно, верхнюю половину экрана P). Длина цилиндров была равна 60 мм. Так как впадины в обеих щеках P и Q имели в глубину свыше 32 мм, то каждый описываемый цилиндр всею своей длиной умещался внутри двух соответствующих впадин, приходившихся одна против другой. Само собой разумеется, что эти полые железные цилиндры со всех сторон были покрыты прочным изолирующим слоем, во избежание непосредственного электрического контакта с внутренней поверхностью впадин Y_1 Y_2.

Благодаря введению железных цилиндров во впадины Y_1 Y_2 (рис. 108) совершенно преграждался прямой путь через щель для магнитных линий, стремившихся проникнуть в центральную камеру. Это касалось прежде всего нормального потока магнитного рассеяния от тороидальной обмотки. Можно считать, что при таких условиях поток рассеяния совсем не доходил до центральной камеры. Аномальный же магнитный поток имел возможность проникать в центральную камеру. Перебегающие магнитные линии аномального потока, конечно, должны были при этом претерпевать чрезвычайно сильное деформирование, которое благоприятствовало отпочковыванию от них свободных магнитных колец. Как показали дальнейшие опыты, в случае введения во впадины Y_1 Y_2 только одного железного цилиндра можно было предполагать, что некоторому сравнительно очень небольшому количеству перебегающих аномальных магнитных линий всё же удавалось проникать в центральную камеру, несмотря на значительные осложнения при обходе железного цилиндра. Но в случае применения двух или трех железных цилиндров, расположенных во впадинах Y_1 Y_2, перебегающие магнитные линии, повидимому, уже совершенно не могли дойти до центральной камеры, а в нее проникали исключительно свободные магнитные кольца, отпочковывавшиеся вследствие наличия ряда препятствий на пути магнитных линий, стремившихся перебегать поперек оси O_1 O_2. Указанные магнитные кольца, скользя по поверхности железных цилиндров, могли легко обходить их и, последовательно сокращаясь, проникать в центральную камеру, где была расположена катушка A.

Как выше мы уже указывали, можно было ожидать сравнительно незначительного результирующего индуктивного эффекта в катушке A, производимого аномальными магнитными кольцами или звеньями, и то лишь благодаря несимметрии всего устройства относительно оси O_1 O_2. Это и было подтверждено непосредственным опытом. Для более успешного обнаружения магнитных колец были изготовлены катушки типа B, представленного на рис. 109. При сохранении наружных размеров катушки A (рис. 108) и при том же количестве витков катушки типа B состояли из двух тождественных половин, соединенных между собою так (рис. 109), чтобы магнитные кольца, входя при своем сокращении внутрь витков подобной катушки, могли обусловить возникновение в обеих ее половинах согласованных индуктивных эффектов, т. е. чтобы электродвижущие силы, индуктируемые в отдельных частях катушки B, имели одно и то же направление в той замкнутой цепи с детектором D и гальванометром G, в которую катушка B включалась вместо катушки A. На рис. 109 изображено одно магнитное звено mm, уже сцепившееся с витками катушки B. Не трудно видеть, что в данном случае магнитное звено или кольцо mm произведет полный индуктивный эффект в цепи катушки B. Перебегающие же аномальные линии могут вызвать лишь ничтожное индуктивное действие на катушку B, обусловленное в основном практической недостижимостью строгой тождественности геометрических размеров обеих половин этой катушки. По той же причине можно было ожидать пренебрежимо малого индуктивного действия на катушку B со стороны нормального потока магнитного рассеяния в случае отсутствия железных цилиндров во впадинах Y_1 Y_2.

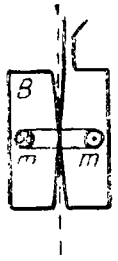


Рис. 109.

Многочисленные наблюдения, произведенные с катушками A и B при применении железных цилиндров и без них, дали очень устойчивые результаты, постоянно имевшие один и тот же характер. Результаты эти, вполне отвечавшие тому, что ожидалось, были во всяком случае весьма любопытны и вряд ли могут быть объяснимы с какой-либо иной точки зрения, не принимающей во внимание преобразований магнитного потока, вообще, и возникновения аномальных магнитных линий, в частности.

г. С катушками A и B было проделано очень большое число экспериментов. Рассмотрим в виде примера следующие результаты, полученные при ширине щели в 0.3 мм и при токе в тороидальной обмотке, равном 2А. Как было уже указано, в этом случае с катушкой A наблюдались максимальное и минимальное отклонения гальванометра, соответственно равные 43 и 1.2 деления шкалы. В тех же условиях, т. е. без применения железных цилиндров во впадинах Y_1 Y_2, с катушкою B наблюдалось максимальное отклонение в 35 делений шкалы и после поворота этой катушки на 180° — минимальное отклонение в 8.5 деления шкалы. Никакой компенсацией при помощи катушек K_1 и K_2 невозможно было достигнуть уменьшения отклонений в 35 и 8.5 деления шкалы. Следовательно, при применении катушки B практически совершенно не приходилось считаться с потоком нормального магнитного рассеяния, и можно было говорить только об индуктивном эффекте аномального магнитного потока. То обстоятельство, что угол поворота катушки B при переходе от максимума к минимуму равнялся 180°, а не 105°, как в случае катушки A, надо полагать, объясняется некоторым различием в геометрических размерах этих двух катушек, а также их практически не одинаковым расположением относительно оси O_1 O_2. Наличие четких

максимума и минимума, отстоящих при применении катушки B на 180°, позволяет заключить, что в данном случае мы встречаемся с геометрическим совпадением наиболее благоприятных условий проявления индуктивных эффектов со стороны обоих видов аномального магнитного потока (перебегающих магнитных линий и магнитных колец). Максимум отклонений гальванометра соответствует простому сложению индуктивных эффектов, обусловленных каждым видом аномального потока в отдельности, а минимум — их вычитанию при повороте катушки B на 180°.

Общий характер наблюдаемых явлений весьма существенным образом изменялся после помещения железных цилиндров во впадины Y_1 Y_2, хотя все прочие условия сохранялись прежними (ширина щели 0.3 мм, $i_1 = 2$А). Когда во впадинах было установлено *три* указанных цилиндра, с катушкою A получалось отклонение гальванометра в 4 деления шкалы, а с катушкою B — значительно большее отклонение, именно 18 делений. Ни то, ни другое отклонение не могло быть уменьшено при помощи компенсирующей катушки K_1. *В обоих случаях отклонения гальванометра (4 и 18 делений шкалы) оставались одними и теми же совершенно независимо от угла поворота катушек вокруг оси* O_1 O_2.

д. Могло казаться, что чрезвычайно сильное влияние, оказываемое железными цилиндрами на весь ход наблюдаемых явлений, представляет собою простой результат чисто емкостной связи, создаваемой цилиндрами между частями щек P и Q со стороны центральной камеры (рис. 108). Действительно, экран PQ образовывал разомкнутый виток, окружавший тороидальную обмотку. Усиление указанной емкостной связи, казалось бы, могло более или менее изменить условия, в которых происходил основной колебательный процесс, и вследствие этого он мог протекать уже как-то иначе. С целью разрешения данного вопроса были произведены специальные контрольные опыты. Вместо железных цилиндров во впадинах Y_1 Y_2 помещались картонные цилиндры той же длины, покрытые оболочкой из медного листка толщиною в 0.1 мм. В средней части цилиндров медная оболочка прерывалась кольцевым разрезом шириною в 2 мм, поперек которого был продолжен лишь отрезок проволочки, своими концами припаянный к обеим половинам медной оболочки. При установке указанных цилиндров во впадины Y_1 Y_2 кольцевой разрез приходился как раз против щели. Таким путем создавался полный эквивалент железных цилиндров в отношении емкостной связи. При этом, конечно, все металлические части, наложенные на картонные цилиндры, покрывались изолирующим слоем. При замене железных цилиндров картонными цилиндрами с медными накладками *не наблюдалось* никаких существенных изменений по сравнению с тем, что было, когда железные цилиндры совсем не вводились во впадины Y_1 Y_2. Попрежнему наблюдались те же самые максимумы и минимумы отклонений гальванометра с обеими катушками A и B. Следовательно, контрольные опыты заставляют отвергнуть предположение о каком-либо особенном влиянии емкостной связи.

В развитие контрольных опытов применялись еще картонные цилиндры, сплошь покрытые тончайшими полупрозрачными листками из серебра или чрезвычайно тонкими алюминиевыми листками. Подобные цилиндры также могли создавать емкостную связь, о которой шла речь. И при введении этих цилиндров во впадины Y_1 Y_2 не наблюдалось того, что было в случае железных цилиндров. Можно отметить лишь незначительное уменьшение разницы между максимальными и минимальными отклонениями гальванометра как при катушке A, так и при катушке B. Ясно, следовательно, что аномальный магнитный поток

при частоте в 10^6 герцев в общем довольно свободно проникал сквозь весьма тонкие металлические листки.

Было выяснено также, что замена железных цилиндров латунными, имевшими приблизительно ту же толщину стенок (около 0.6 мм), совершенно не отражалась на характере наблюдаемых явлений. Максимумы и минимумы исчезали и сохранялись неизменными постоянные отклонения гальванометра: 4 деления шкалы в случае катушки A и 18 делений в случае катушки B. Собственно говоря, этого результата и следовало ожидать. При той высокой частоте, которая применялась во время опытов (около 10^6 герцев), замена железа латунью и не могла внести существенных изменений, так как в обоих случаях толщина стенок металлической преграды для магнитных линий переменного поля была более чем достаточной, чтобы скин-эффект мог проявиться в полной мере.

е. Описанные контрольные опыты и вообще все полученные результаты представляют интерес еще в том отношении, что они позволяют произвести некоторую оценку обстановки эксперимента и степени надежности принятых мер, имевших целью по возможности устранить всякие вредные внешние влияния. Необходимо признать, что *экранировка всей измерительной части схемы от непосредственного влияния электромагнитных излучений высокочастотного генератора была вполне удовлетворяющей своему назначению, так как эти излучения не были в состоянии как-либо замаскировать чрезвычайно важную роль металлических цилиндров, вводимых во впадины* Y_1 Y_2 *(рис. 108). Как было отмечено выше, одно только наличие указанных цилиндров во впадинах* Y_1 Y_2 *при прочих равных условиях коренным образом влияло на характер наблюденных результатов.* Не подлежит сомнению, что индуктивные воздействия на катушки A и B со стороны магнитных процессов, связанных с тороидальной обмоткой, фактически осуществлялись *только через щель*, соединявшую внутреннюю полость экрана PQ с центральной камерой. Всякая значительная преграда для магнитных линий, помещенная внутри щели и поперек нее, действительно могла в значительной мере изменять эти индуктивные воздействия.

То обстоятельство, что максимумы и минимумы отклонений гальванометра, наблюдавшиеся без применения металлических цилиндров, исчезали при введении указанных цилиндров во впадины Y_1 Y_2 (полнее всего это наблюдалось при трех цилиндрах), неопровержимо свидетельствует о задерживании в последнем случае перебегающих аномальных магнитных линий. В центральную камеру проникали при этом лишь отпочковавшиеся магнитные кольца. Наблюденное после введения трех металлических цилиндров увеличение бывших ранее минимальных отклонений, 1.2 деления шкалы (для катушки A) и 8.5 деления (для катушки B), соответственно до 4 и 18 делений — в основном объясняется именно совершенным устранением в данном случае перебегающих аномальных магнитных линий. Индуктивный эффект этих магнитных линий, как уже указывалось выше, вычитался в случае минимума из индуктивного эффекта, производимого аномальными магнитными кольцами. Независимость отклонений в 4 и 18 делений шкалы от угла поворота катушек вокруг оси O_1 O_2 также подтверждает правильность заключения о том, что при наличии трех металлических цилиндров во впадинах Y_1 Y_2 аномальный магнитный поток появлялся в центральной камере только в виде магнитных колец или звеньев и что в данном случае только эти магнитные звенья обусловливали индуктивный эффект в катушках A и B.

ж. Вся совокупность результатов, полученных во время экспериментов с тороидальной обмоткой, окруженной разомкнутым железным экраном, позволяет утверждать следующее:

Во-первых, *непосредственным опытом полностью оправдываются далеко идущие выводы, сделанные нами из исходных положений Фарадея, касающихся простейшего случая преобразований магнитного потока, именно случая двух магнитов* (*§ 25*).

Во-вторых, *доказана объективная реальность аномального магнитного потока.*

В-третьих, *констатировано наличие двух составляющих аномального магнитного потока: перебегающих магнитных линий и свободных магнитных колец или звеньев.*

В-четвертых, *найдены условия, при которых можно наблюдать только проявления аномальных магнитных колец.*[1]

В-пятых, *результаты вышеописанных опытов действительно находятся в совершенном согласии с основной идеей Фарадея о физически существующих магнитных линиях.*

Таким образом, содержание настоящего заключительного параграфа Главы IV по существу представляет собой подведение итогов всему тому, что было сказано о преобразованиях магнитного потока вообще.

---

[1] Это важное обстоятельство было использовано в дальнейших опытных исследованиях преобразований магнитного потока (см. § 61 Главы VI).

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРОБЛЕМА МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРОВОДНИКОВ. УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ

§ 41. Магнитное экранирование и зубчатые арматуры

а. Известно, что при внесении ферромагнитных материалов в магнитное поле происходят соответствующие перераспределения магнитного потока. Магнитные линии как бы стремятся в наибольшем возможном количестве пройти по пути, где магнитная проницаемость значительно превышает магнитную проницаемость „пустоты" (эфира). Здесь мы встречаемся с таким случаем преобразований магнитного потока, когда в результате слияния магнитных линий внешнего потока с элементарными потоками внутренних магнитных систем ферромагнитного материала, входящего в состав магнитной цепи, возникает деформирование внешнего потока, которое в основном выражается в сгущении его в частях с большой магнитной проницаемостью. Мы вкратце касались уже этого вопроса при рассмотрении рис. 42 и 43 (§ 26 Главы IV).

Практически при построении разного рода электромагнитных приборов и механизмов в качестве ферромагнитных материалов обычно применяют железо и его сплавы.

Если внутри какой-либо изготовленной из железа части прибора образована полость, не заполненная железом, и если указанная часть находится во внешнем магнитном поле, то внутри данной полости поле оказывается сильно ослабленным вследствие сгущения магнитных линий в железе. Этим пользуются в ряде случаев, когда требуется значительно уменьшить интенсивность воздействия внешнего магнитного поля на некоторую систему. Получается то, что принято называть *магнитным экраном.*

Магнитные экраны применяются, например, в так называемых панцырных гальванометрах, основные части которых окружают железными оболочками с целью ослабить влияние земного магнитного поля на подвижную часть гальванометра и в связи с этим повысить его чувствительность. С экранирующим действием железа мы имеем дело и в разного рода электротехнических устройствах и механизмах, магнитная цепь которых обычно включает в себя железные части той или иной формы. Целесообразное и закономерное использование магнитного экранирования во многих случаях оказывается весьма полезным. Иногда, однако, делаются попытки приписать магнитным экранам функции, которые по существу не могут быть ими выполнены. Сказанное относится главным образом к случаям применения магнитных экранов в процессах электромагнитной индукции. Именно на этом обстоятельстве мы и сосредоточим внимание в настоящей главе.

6. Правильные представления об основных условиях возникновения индуктированной электродвижущей силы имеют весьма важное значение при рассмотрении процессов, происходящих в ряде электромагнитных механизмов. Недостаточно отчетливое понимание существа дела нередко приводило к серьезным недоразумениям. Бывали примеры того, что даже весьма опытные электрики, работавшие над расчетом электрических машин, глубоко ошибались, утверждая, что якобы формулировки, данные Фарадеем и Максвеллом, вытекают из представлений о процессе электромагнитной индукции, принципиально расходящихся между собою в отношении непосредственной причины этого явления.

На страницах заграничных и русских электротехнических журналов периода 1895—1900 гг. нашла свое отражение полемика, возникшая по поводу условий, при которых происходит индуктирование электродвижущей силы в зубчатых арматурах электрических машин. Якори электрических машин в первоначальных конструкциях представляли собой, как известно, гладкие железные цилиндры (или кольца), на поверхности которых вдоль образующих укладывались составлявшие обмотку проводники (схематический рис. 110). При вращении якоря в магнитном

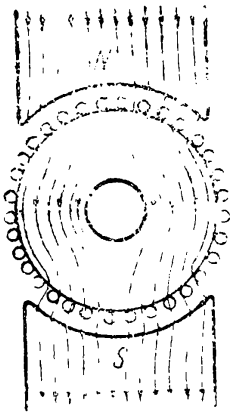


Рис. 110.

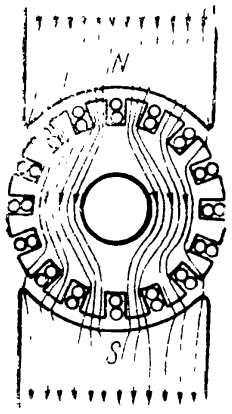


Рис. 111.

поле эти проводники пересекают магнитные линии, причем величина индуктированной электродвижущей силы при расчете динамомашины определяется обычно именно по скорости пересечения магнитного потока проводниками, т. е. применяется фарадеевская формулировка закона электромагнитной индукции:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Однако с конструктивной точки зрения гладкие якори представляют значительные неудобства. Дело в том, что механические усилия, приложенные к проводам обмотки, особенно в случаях ненормальных режимов (короткие замыкания и т. п.), оказываются нередко чрезмерно большими. В связи с этим приходилось уделять большое внимание вопросам крепления обмотки на поверхности гладкого якоря. Применением специальных бандажей, которые стягивают обмотку, более или менее удовлетворительно решается вопрос о предохранении ее от действия нормальных к поверхности якоря центробежных сил. Гораздо бо́льшие практические трудности встречаются в отношении мер защиты проводов от действия тангенциальных усилий, которые в случае чрезмерно сильных токов, могущих возникнуть при какой-либо аварии, иногда совершенно разрушали обмотку, уложенную на гладком якоре. Такого рода затруднения,

происходящие от тангенциальных усилий, конструктивно совершенно устраняются применением зубчатых якорей, к которым современная техника динамостроения окончательно перешла. Провода обмотки укладываются при этом в продольных впадинах между зубцами (рис. 111), благодаря чему провода получают солидную опору в тангенциальном направлении и совершенно устраняется опасность их сдвижения по поверхности железного якоря. При такой конструкции магнитный поток, входя в якорь, не распределяется равномерно по его окружности, а вследствие большей магнитной проводимости железа направляется главным образом через зубцы. Провода же, утопленные во впадинах, оказываются в данном случае в значительной степени заэкранированными и находящимися в магнитном поле, во много раз более слабом, чем в случае гладкой арматуры.

Казалось бы, что во время обычного вращения всей системы между полюсами N и S перемещение проводников, расположенных в сравнительно очень слабом магнитном поле, должно будет сопровождаться соответственно незначительным числом пересечений этими проводниками магнитных линий, а следовательно, и незначительной величиной индуктированной электродвижущей силы. Опыт, однако, показывает, что при той же величине главного магнитного потока и вообще при прочих равных условиях динамомашина с зубчатым якорем развивает в точности такую же электродвижущую силу, что и машина с гладким якорем. Это именно обстоятельство и вызвало в свое время большие разногласия и споры в среде электротехников. Для объяснения создавшегося противоречия некоторыми и было выдвинуто следующее ошибочное положение: в случае зубчатого якоря электродвижущая сила в основном индуктируется не вследствие пересечения магнитных линий проводниками, а потому, что претерпевает периодические изменения магнитный поток, пронизывающий витки обмотки якоря, и что величину индуктируемой в данном случае электродвижущей силы надо рассчитывать, основываясь на максвелловской формулировке:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Иными словами, высказывалось утверждение, будто бы две рассмотренные нами выше первая и вторая формулировки закона электромагнитной индукции (фарадеевская и максвелловская) выражают не одно и то же и не могут трактоваться как вполне эквивалентные одна другой при описании процессов, происходящих в обычных электромагнитных генераторах. Между тем подобное утверждение в корне не верно и свидетельствует только о том, что авторы его были весьма далеки от понимания принципа непрерывности магнитного потока и совершенно игнорировали всё важное значение этого принципа.

Магнитный поток, сцепляющийся с каким-либо витком обмотки якоря динамомашины, абсолютно не может претерпеть ни малейшего изменения без того, чтобы соответствующие магнитные линии, входящие в состав данного потока, не были пересечены отдельными участками провода, образующего виток. В случае гладкого якоря подобного рода пересечения самоочевидны, а в случае зубчатого якоря они в значительной степени замаскированы магнитной экранировкой и на первый план как будто бы выступает изменение потока, охватываемого витком. Но, конечно, точно такое же изменение претерпевает магнитный поток, охватываемый витком и в случае гладкой арматуры. В следующем § 42 мы подробнее ознакомимся с физическим смыслом экранирования

проводников от магнитного поля, т. е. ослабления магнитного поля в непосредственной близости к проводнику благодаря применению железного экрана, роль которого в рассматриваемом случае играют зубцы якоря. В связи с этой экранировкой скорость действительного перемещения магнитных линий относительно пересекающего их проводника, уложенного между железными зубцами, оказывается во много раз больше скорости видимого движения проводника. В результате скорость пересечения магнитных линий, т. е. величина индуктируемой электродвижущей силы, будет такою же, как и в случае гладкого якоря.

Рассмотренный спор по поводу зубчатых и гладких якорей весьма поучителен, так как до последнего времени возникают недоразумения, объясняющиеся только недооценкой универсальности и непреложности принципа непрерывности магнитного потока. Осознание же этого принципа совершенно необходимо при рассмотрении процессов, происходящих в электромагнитных генераторах. В противном случае иногда случается, что некоторые авторы новых конструкций динамомашин приходят к парадоксальным результатам (см. § 44).

§ 42. Магнитное экранирование проводников

а. Проводник, окруженный железным экраном, оказывается более или менее защищенным от внешнего магнитного поля лишь в отношении одной части возможных воздействий этого поля на проводник (воздействия механического характера). Остается еще некоторая категория воздействий внешнего магнитного поля, от которых *никакая* защита проводника принципиально невозможна (электромагнитная индукция).

Для того чтобы выяснить физический смысл магнитной экранировки проводников, рассмотрим следующий случай. Представим себе прямолинейный проводник, расположенный поперек однородного магнитного поля, как показано на рис. 112, где C есть сечение проводника. Допустим, что проводник этот равномерно движется слева направо со скоростью u_1 в направлении, перпендикулярном полю и самому проводнику. Обозначим через l длину некоторой части проводника, находящейся в данном однородном поле, а через B_1 — величину соответствующей магнитной индукции. Электродвижущая сила, индуктируемая в рассматриваемой части проводника, выразится так:

$$e_1 = B_1 l u_1.$$

Ясно, конечно, что в количественном и качественном отношении процесс электромагнитной индукции не должен зависеть от того, движется ли проводник в неподвижном магнитном поле или же проводник остается неподвижным, а магнитные линии внешнего потока перемещаются в обратном направлении с тою же скоростью поперек проводника. В современных электромагнитных механизмах встречается и то и другое: в обычных динамомашинах постоянного тока якорь вращается в неподвижном магнитном поле, а в больших генераторах переменного тока проводники арматуры неподвижны, перемещается же внешнее магнитное поле, создаваемое вращающейся системой электромагнитов.

Предположим теперь, что рассматриваемая часть прямолинейного проводника окружена магнитным экраном в форме, например, железной трубки T (рис. 113). При этом изменится распределение магнитного потока в области расположения проводника. Вследствие большой магнит-

ной проницаемости железа магнитные линии сгустятся в стенках трубки и окажутся в значительной степени разреженными внутри трубки, т. е. именно там, где находится проводник. Совершенно очевидно, что в полости внутри железной трубки магнитная индукция B_2 будет значительно меньше, чем это было раньше в случае незаэкранированного проводника, т. е.

$$B_2 < B_1.$$

Если скорость видимого движения заэкранированного проводника остается прежняя, т. е. u_1, то на первый взгляд может показаться, что величина электродвижущей силы, индуктируемой в этом случае, будет меньше, чем при отсутствии железного экрана. Однако такое заключение было бы ошибочно. Оно противоречило бы принципу непрерывности магнитного потока. Магнитные линии не могут претерпевать никакого

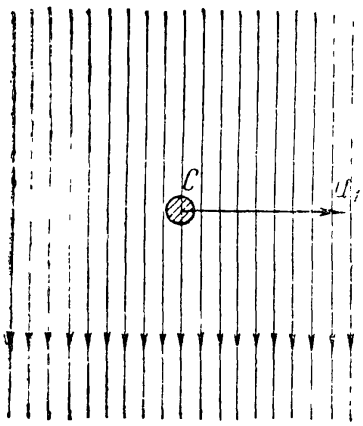


Рис. 112.

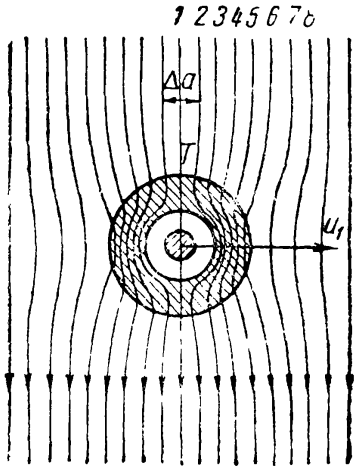


Рис. 113.

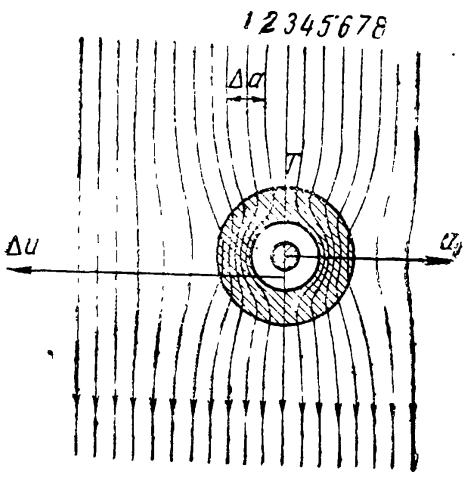


Рис. 114.

разрыва. Следовательно, при том же видимом перемещении проводника количество пересеченных им магнитных линий должно быть тождественно в обоих случаях (рис. 112 и 113).

Выясним это подробнее. Рассмотрим заэкранированный проводник в момент времени, когда он успел уже продвинуться в пространстве на расстояние Δa. На рис. 114 схематически представлено расположение магнитных линий для этого момента, причем нумерация интересующих нас линий сохранена одной и той же на рис. 113 и 114. Как видим, в полости внутри трубки место магнитной линии *1* (рис. 113) занимает теперь на рис. 114 магнитная линия *3*. Магнитная линия *1* вошла в стенку железной трубки *T* влево от проводника. Туда же успела перекинуться и магнитная линия *2*. Раньше (рис. 113) магнитные линии *7* и *8* были расположены вне железной трубки *T*, справа от нее. Теперь (рис. 114) эти магнитные линии оказываются вошедшими уже в стенку трубки *T* и заняли там место сместившихся влево магнитных линий *5* и *6*. Весьма важно особо отметить, что магнитная линия *2* переместилась относительно проводника справа налево на расстояние, превышающее видимое перемещение (Δa) заэкранированного проводника. На основании этого заключаем, что u_2 — скорость действительного перемещения магнитных линий поля *относительно проводника* — в случае наличия железного экрана будет больше скорости видимого движения проводника, т. е. больше u_1. Следовательно, мы встречаемся здесь с добавочною скоростью встречного

движения магнитных линий Δu. Иными словами, должно иметь место соотношение:

$$u_2 = u_1 + \Delta u.$$

Появление добавочной скорости Δu объясняется тем, что область внутри железного экрана оказывается как бы слабо проводящей магнитный поток. Для того чтобы все магнитные линии успели пересечь проводник за время его перемещения, необходима добавочная скорость их относительного движения.

Вышеприведенные рассуждения являются совершенно необходимым следствием *принципа непрерывности магнитного потока*. Справедливость заключений, к которым мы пришли, руководствуясь этим основным принципом, полностью подтверждается непосредственным опытом. *Всегда величина индуктированной электродвижущей силы при прочих равных условиях остается одною и тою же независимо от того, будет ли проводник окружен железным экраном или нет.*

Таким образом, электродвижущую силу, индуктируемую в рассматриваемом случае заэкранированного проводника (рис. 113 и 114), мы можем выразить так:

$$e_2 = B_2 l u_2.$$

Так как на основании принципа непрерывности магнитного потока мы должны утверждать, что

$$e_2 = e_1,$$

то можем написать:

$$B_2 l u_2 = B_1 l u_1.$$

Следовательно

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{B_1}{B_2}.$$

Во всех случаях применения магнитного экранирования проводников действительная скорость их перемещения относительно внешнего магнитного потока будет обратно пропорциональна степени уменьшения величины магнитной индукции внутри заэкранированной части пространства.

6. Добавочная скорость наблюдается вообще всегда, когда в процессе какого-либо относительного перемещения встречается местное сопротивление для одной из двух движущихся навстречу систем и когда эта система легко может претерпевать разного рода деформирование.

В виде аналогии того, что происходит при движении заэкранированного проводника во внешнем магнитном поле, рассмотрим следующий пример. Представим себе некоторый закрытый днищами цилиндрический сосуд (рис. 115). Допустим, что он заполнен водой. Пусть некоторая точка A движется в данном сосуде слева направо со скоростью u_1. Это будет скорость, с которой точка A перемещается относительно воды. Теперь представим себе другую картину (рис. 116): тот же сосуд, но с движущимся внутри него поршнем P, в центральной части которого проделан канал с поперечным сечением s_2. Если рассматриваемая точка A жестко связана с поверхностью канала в поршне P, то при движении поршня со скоростью u_1 точка A будет обладать тою же скоростью u_1 относительно стенок цилиндрического сосуда. Но скорость точки A относительно воды оказывается в этом случае иная, и именно больше u_1. Действительно, вследствие меньшей „проницаемости“ канала, т. е. по причине того, что площадь сечения его s_2 меньше s_1 — площади поперечного

сечения цилиндрического сосуда, вода при переходе из правой части сосуда в левую будет иметь в канале добавочную скорость Δu. При этом скорость встречи точки A с водой, т. е. скорость движения воды в канале поршня P относительно самого поршня и связанной с ним точки A, будет выражаться так:

$$u_2 = u_1 + \Delta u.$$

Совершенно очевидно, что

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{s_1}{s_2}.$$

Нечто в значительной степени аналогичное происходит и в случае движения заэкранированного проводника поперек внешнего магнитного потока (рис. 113 и 114). Подобно тому как вся вода за время некоторого перемещения поршня P (рис. 116) должна пройти мимо точки A со скоростью $u_2 > u_1$, заэкранированный проводник должен пересечь весь магнитный поток, встречающийся на пути перемещения этого проводника, причем скорость этой встречи u_2 будет больше, чем видимая

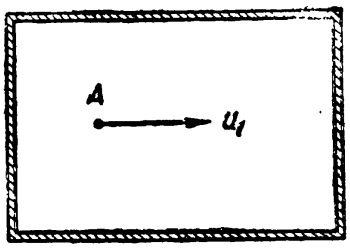


Рис. 115.

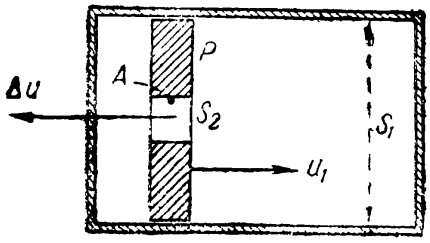


Рис. 116.

скорость u_1, с которой проводник движется относительно магнитного потока. Плотность потока в непосредственной близости около проводника, т. е. магнитная индукция B, будет различна в случаях заэкранированного и незаэкранированного проводника. Эффект магнитной экранировки в полной мере эквивалентен тому, как если бы магнитная проницаемость пространства, в котором находится проводник, становилась меньше, чем при отсутствии железного экрана. Поэтому в этих двух случаях и будет различна действительная скорость встречи проводника с пересекаемыми им магнитными линиями. Понимание происходящего процесса в известной мере затруднительно, так как мы не можем видеть магнитных линий и, следовательно, не можем примитивными средствами обнаруживать их добавочное движение. Но только так, как изложено выше, можно и должно трактовать механизм рассматриваемого явления, если исходить из принципа непрерывности магнитного потока и из фарадеевского представления о реально существующих магнитных линиях.

в. Всё, что мы говорили о физическом смысле магнитной экранировки проводов, очень наглядно иллюстрируется следующим простым опытом. Начертим на листе белой бумаги ряд параллельных линий, равно отстоящих одна от другой (рис. 117). Представим себе далее, что наш глаз смотрит на этот ряд линий через какую-либо лупу L. Линии, рассматриваемые при посредстве лупы, кажутся раздвинувшимися по сравнению с тем, что наблюдается за пределами оправы лупы. Начнем

теперь двигать лупу поперек линий слева направо. В то время как линии вне оправы остаются неподвижными, те линии, которые мы наблюдаем сквозь лупу, кажутся перебегающими справа налево с некоторою добавочною скоростью Δu относительно самой лупы. Для большей полноты аналогии с тем, что происходит в случаях движения заэкранированного проводника во внешнем магнитном поле, наклеим в центре лупы L какой-либо небольшой бумажный кружок C, который будет соответствовать сечению проводника на рис. 112—114. Этот кружок при движении лупы будет казаться пересекающим все начерченные на бумаге линии.

Если бы в оправу лупы было вставлено, вместо двояковыпуклого, простое плоскопараллельное стекло с подобным наклеенным в середине бумажным кружком C, то при перемещении оправы слева направо со скоростью u_1 мы увидели бы, что с той же относительной скоростью кружок C встречается с рассматриваемыми линиями. Но картина, наблю-

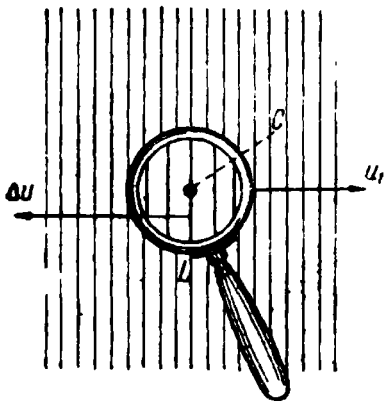


Рис. 117.

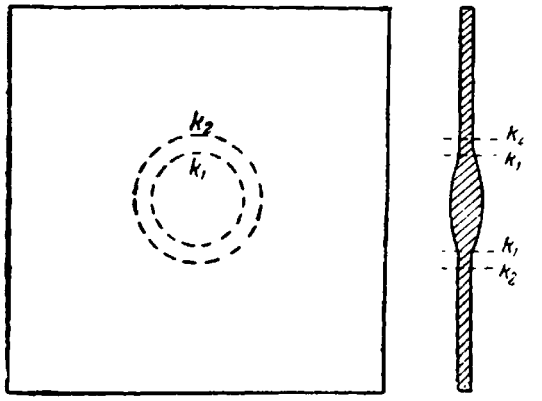


Рис. 118.

даемая нами при наличии двояковыпуклого стекла, будет от этого существенно отличаться. Относительная скорость встречи кружка C и начерченных линий, u_2, будет казаться нам значительно больше, так как самые линии представляются обладающими добавочною скоростью Δu, направленною навстречу движущемуся кружку C, т. е. справа налево. Получается, таким образом, уже знакомое нам соотношение

$$u_2 = u_1 + \Delta u.$$

Особенно важно отметить в рассматриваемой аналогии следующее. Полное число линий, пробегающих мимо кружка при передвижении лупы от одного края начерченной группы линий до другого ее края, будет такое же, как если бы этот кружок C был наклеен не на двояковыпуклом, а на плоскопараллельном стекле. Аналогично и число магнитных линий, пересеченных заэкранированным проводником (рис. 113 и 114) за время продвижения его поперек некоторого внешнего магнитного потока, должно быть в точности равно числу пересечений этих же магнитных линий незаэкранированным проводником (рис. 112).

Описанная аналогия была бы еще совершеннее, если бы, вместо лупы в обычной оправе, мы могли применить специально отшлифованную стеклянную пластинку, на середине которой было бы образовано соответствующее утолщение, переходящее затем в плоскопараллельную часть пластинки. На рис. 118 представлен общий вид и разрез подобной комбинации. Таким образом, лупа составляла бы одно целое со всей пластинкой. Кривизна поверхности ее меняет свой знак при переходе

от утолщения к окружающим плоскопараллельным частям стеклянной пластинки. Пояс, ограниченный концентрическими окружностями k_1 и k_2 (пунктирные линии), является местом плавного перехода от собственно лупы к плоскопараллельной пластинке. В данном случае оправа лупы не закрывала бы от глаза начерченных линий на части их протяжения, и общий характер картины их расположения в значительной степени будет напоминать схему распределения магнитных линий в случае наличия железного экрана (рис. 113 и 114). Сгущению магнитных линий в этом экране будет соответствовать видимое сгущение начерченных на бумаге линий в кольцевой зоне между окружностями k_1, k_2 (рис. 118).

Если внимательно и во всех деталях проследить аналогию, которую мы только что подвергли рассмотрению, то она может облегчить понимание безусловной необходимости возникновения добавочной скорости магнитных линий, когда применяется магнитное экранирование проводников, движущихся поперек внешнего магнитного поля. Природа явления в описанных двух случаях (рис. 114 и 117) совершенно различна, но чисто геометрические условия, характеризующие протекание процессов в обоих случаях, имеют много общего.

г. Игнорирование принципа непрерывности магнитного потока всегда приводило и до последнего времени нередко приводит к неправильным выводам в отношении роли магнитных экранов. В качестве поучительного примера такого рода ошибок очень полезно рассмотреть схему особого электромагнитного тахометра, который был предложен с целью непосредственного определения скорости движения морских судов относительно земли или, вернее сказать, относительно земного магнитного поля. Подобный прибор был спроектирован и построен одним весьма компетентным изобретателем в 1908 г. Он имел бы большое практическое значение, если бы ожидаемый эффект получился в действительности. Попытка эта была вызвана тем обстоятельством, что обычно применяемые во флоте устройства для определения скорости корабля дают только скорость движения относительно воды. Существование морских течений, скорость которых достигает иногда значительной величины, требует специальных поправок при вычислении действительного расстояния, пройденного судном.

Принцип устройства проектированного электромагнитного тахометра заключался в следующем (рис. 119). Поперек судна прокладывается проводник AB, в котором во время хода должна индуктироваться соответствующая электродвижущая сила вследствие непрерывного пересечения вертикальной составляющей земного магнитного поля. Казалось бы эту электродвижущую силу можно измерить, включив в цепь указанного проводника AB некоторый гальванометр G. Однако очевидно, что при таком осуществлении схемы в проводнике CD, замыкающем цепь, также будет индуктироваться электродвижущая сила, по абсолютной величине равная, но по направлению в контуре цепи прямо противоположная той, которая возникает в проводнике AB. Гальванометр, конечно, не покажет никакого отклонения. Тут-то и появилась мысль уменьшить эту обратную электродвижущую силу, заключив проводник CD в железную трубу T и заэкранировав таким образом его от магнитных воздействий со стороны земного поля. Предполагалось, что земное магнитное поле, ослабленное внутри железной трубы в сотни раз, обусловит индуктирование в проводнике CD сравнительно ничтожно малой обратной электродвижущей силы. К великому удивлению изобретателя, такая предохранительная мера ни к чему не привела: гальванометр и в этих условиях не давал никаких отклонений. Изобретатель

не был склонен считаться с принципом непрерывности магнитного потока, на что ему неоднократно указывал автор настоящей книги, и не был в состоянии осознать действительную роль магнитного экранирования в процессе электромагнитной индукции, а всё пытался приписать свои неудачи недостаточно совершенной защите проводника *CD* от внешнего магнитного поля. Рассмотренный пример весьма наглядно иллюстрирует, насколько формально обычно воспринимается закон электромагнитной индукции. После всего изложенного выше должно быть ясно, что электромагнитный тахометр был задуман принципиально ошибочно и что иного результата, кроме отрицательного, не могло получиться.

д. Теперь вернемся к вопросу о зубчатых арматурах (см. § 41). Напомним, что в области динамостроения переход к таким арматурам был вызван выяснившейся необходимостью более надежно укреплять обмотку динамомашины. На рис. 120 изображена мысленно выделенная часть зубчатой арматуры. Здесь представлена одна впадина между двумя зубцами. Во впадине помещен проводник, по которому проходит ток

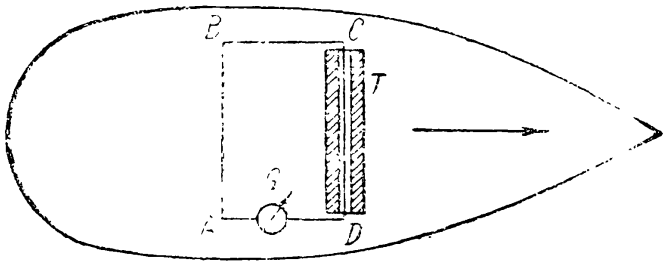


Рис. 119.

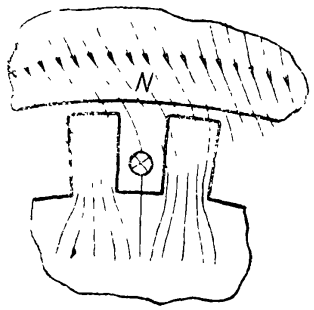


Рис. 120.

(скажем, от нас за плоскость чертежа). Сосуществование магнитного поля тока и внешнего магнитного потока приводит к тому, что этот последний претерпевает преобразование, сливаясь с магнитными линиями тока и соответственным образом деформируясь. Преобразования магнитного потока осложняются еще тем обстоятельством, что входящие в его состав магнитные линии сильно сгущаются в железных зубцах, которые играют роль экрана, хотя и не вполне окружающего проводник. Вследствие наличия электрического тока в проводниках арматуры результирующее распределение магнитного потока будет несимметрично в отношении каждого из зубцов.

При одном и том же главном магнитном потоке динамомашины магнитное поле во впадинах, т. е. там, где уложены проводники, оказывается во много раз слабее, чем было бы в случае гладкой арматуры (рис. 110). Что касается величины электродвижущей силы, которая при вращении арматуры будет индуктироваться в каждом уложенном во впадину проводнике, то в данном случае всё будет происходить совершенно так же, как и при магнитном экранировании проводника железной трубкой (рис. 113 и 114), о чем была речь выше. Возникновение добавочной скорости магнитных линий и в рассматриваемом случае зубчатой арматуры обусловит возникновение точно такой же электродвижущей силы, как это получается в гладких арматурах. После всего того, что было уже сказано о роли магнитной экранировки проводников в процессе электромагнитной индукции, становится вполне выясненной основная причина возникновения упомянутого выше спора (§ 41) об истинном механизме генерирования электродвижущей силы в гладких

и зубчатых арматурах. Всё дело в том, что в этом споре, как было уже указано выше, обнаружилось недостаточное понимание сущности принципа непрерывности магнитного потока, а также недооценка исключительно важного значения этого принципа. Только на этой почве и могла появиться мысль о каком-то ошибочном противопоставлении фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции.

е. В связи с рассмотрением электромагнитных процессов, протекающих в зубчатых арматурах, необходимо отметить одно крайне любопытное обстоятельство. Дело в следующем. С одной стороны, первоначально мысль об укладывании проводников во впадины между зубцами возникла у конструкторов динамомашин в результате стремления улучшить способ механического крепления проводов, который в случае гладких арматур далеко не всегда достигал своей цели. С другой же стороны, в зубчатых арматурах те тангенциальные силы, которые приложены к проводникам даже при чрезмерной перегрузке машины в случаях, например, аварийных режимов, оказываются столь ничтожными, что сама собой отпадает какая-либо надобность уделять особое внимание механическому креплению проводников арматуры. Таким образом, получается до известной степени парадоксальный результат. Оказывается, что практически совершенно устраняется самая потребность значительно усиливать крепление проводников арматуры, когда применяются зубцы. Эти зубцы действительно могли бы обеспечить прочную опору для проводников и надежно удерживать их на месте, если бы они подверглись большим тангенциальным усилиям, стремящимся их сдвинуть, но в случае зубцов подобные усилия и не возникают.

Всё сказанное есть прямое следствие того, что вследствие экранирующего действия железных зубцов магнитное поле во впадинах значительно ослабляется. В этом случае при прочих равных условиях магнитная индукция B в местах расположения проводников может быть в сотни раз меньше по сравнению с гладкими арматурами. А потому и приложенная к каждому проводнику электромагнитная сила, т. е. сила механического взаимодействия тока, протекающего по проводнику, и внешнего магнитного потока, выражающаяся так (см. примечание к § 49):

$$f = Bli,$$

оказывается практически очень малой. Это заключение подвергалось тщательной проверке в опытах английского электротехника Мордея, подтвердившего, что механические усилия, приложенные к утопленному во впадине проводнику, действительно ничтожны.

Однако может быть задан один весьма существенный вопрос. Если электромагнитная сила, приложенная к проводникам, находящимся во впадинах между зубцами, становится сравнительно очень малой, то как же возникает нормальный вращающий момент в электродвигателях с зубчатой арматурой? Объяснение этому заключается в той несимметрии магнитного потока в отношении зубцов, которая была отмечена выше при рассмотрении рис. 120. Тяжение магнитных линий, косо входящих в каждый из железных зубцов, своей тангенциальной составляющей в точности восполняет убыль вращающего момента, определяемую уменьшением сил, которые приложены непосредственно к проводникам. Таким образом, в случае зубчатых арматур механические усилия электромагнитного происхождения в значительной степени перекладываются с проводников на железные зубцы.

В настоящее время применение зубчатых арматур прочно вошло в практику динамостроения и укоренилось здесь. Между прочим, этим достигается уменьшение всех междужелезных пространств в главной магнитной цепи и тем самым весьма заметно понижается магнитное сопротивление цепи, что позволяет соответственно ослабить ампервитки возбуждения и достигнуть известной экономии. Сверх того, имеются еще и другие выгоды, вытекающие из применения зубчатых арматур, введение которых в общем явилось важным фактором в ряде обстоятельств, обусловивших совершенство конструкции современных электромагнитных генераторов и двигателей.

ж. Резюмируя всё сказанное в настоящем и предыдущем параграфах по поводу магнитного экранирования, мы можем утверждать следующее:

1. Основной эффект магнитного экранирования заключается в том, что в пространстве, полностью или частично окруженном материалом с большой магнитной проницаемостью, магнитная сила H и магнитная индукция B оказываются меньше, чем это было бы в случае отсутствия экрана.

2. Магнитное экранирование достигает своей цели вообще всегда, когда оно применяется для ослабления чисто механических воздействий внешнего магнитного поля на некоторую подвижную систему (например, магнитную стрелку или проводник с током).

3. Когда магнитный экран и самый источник внешнего магнитного поля остаются неподвижными, а в полости, окруженной экраном, перемещается в ослабленном магнитном поле один только проводник, то индуктируемая в нем электродвижущая сила, конечно, получается соответственно меньше, чем это было бы при отсутствии экранирования.

4. Если же относительно внешнего магнитного поля перемещается проводник *вместе с окружающим его магнитным экраном*, то никакими конструктивными видоизменениями этого экрана невозможно добиться какого бы то ни было уменьшения величины индуктируемой электродвижущей силы по сравнению с тем, что получается без магнитного экранирования. Это положение, повторяем, непосредственно вытекает из принципа непрерывности магнитного потока.

§ 43. Бесколлекторная или униполярная машина постоянного тока

а. Как известно, в современной электротехнической практике для генерирования постоянного тока пользуются в основном коллекторными машинами. При вращении якоря подобного рода машины проводники, в которых индуктируется электродвижущая сила, последовательно проходят мимо разноименных полюсов электромагнита и поочередно пересекают магнитный поток то одного, то другого направления. При этом в каждом отдельном элементе якорной обмотки генерируется переменная электродвижущая сила и только благодаря применению коллектора, о поверхность которого трутся надлежащим образом размещенные щетки, достигается коммутирование, в результате чего во внешнюю цепь, присоединяемую к щеткам, посылается ток постоянного направления. Процесс коммутирования тока, осуществляемый при посредстве коллектора и щеток, представляет собой наиболее ответственный момент в работе обычной динамомашины постоянного тока. Требуется внимательный уход за поверхностью коллектора и за щетками во избежание перекрытия

огнем (искры, вольтовы дуги) промежутков между соседними пластинами коллектора, разность потенциалов между которыми приходится допускать довольно большую при повышении нормального рабочего напряжения динамомашины. Именно это обстоятельство и кладет предел тому напряжению, на которое практически возможно осуществить устойчиво работающую коллекторную машину постоянного тока. Удается более или менее хорошо спроектировать и построить такую машину на напряжение порядка 5000 V. Хотя были попытки повысить это напряжение до 30 000 V и даже несколько выше, но всё это не привело к вполне удовлетворительным результатам. Таким образом, приходится считаться с невозможностью построения коллекторной машины постоянного тока на сколько угодно большие напряжения (100 kV и выше).

6. В ряде специальных случаев, когда необходимо генерировать очень сильные токи при сравнительно небольших напряжениях, не превышающих десятков вольтов и, как максимум, порядка сотни вольтов, — находят себе применение так называемые *бесколлекторные* динамомашины постоянного тока. В виду того, что в этих машинах проводник, в котором индуктируется электродвижущая сила, движется неизменно мимо одного и того же магнитного полюса, всё время пересекая магнитный поток одного и того же направления, их часто называют *униполярными* машинами. Генерируемая в них электродвижущая сила ни в одной части цепи не меняет своего знака и всё время остается направленной в одну и ту же сторону. В этом и заключается принципиальное отличие униполярных машин от обычных коллекторных машин постоянного тока, которые являются по существу *биполярными*. Суть дела состоит лишь в особенностях чисто геометрических условий, в которых протекает процесс электромагнитной индукции. Однако отсюда вытекает необходимость различного конструктивного оформления машин того и другого рода.

Интересно отметить, что первая бесколлекторная (униполярная) машина постоянного тока была фактически осуществлена Фарадеем еще в 1831 г. в ближайшие же дни после открытия явлений электромагнитной индукции тока. На рис. 121 воспроизведен оригинальный эскиз Фарадея, изображающий схему его опыта с униполярной индукцией. Здесь N и S — полюсы мощного постоянного магнита, помещенного в особом ящике. Для концентрации магнитного поля были применены две специальные железные накладки, удерживаемые в горизонтальном положении силою притяжения к полюсам. Между этими полюсными наконечниками вращался вокруг горизонтальной же оси медный диск. Две проволоки, не показанные на рисунке и игравшие роль металлических щеточек, прикасались к проводящему валу диска и к его периферии в месте, приходившемся как раз между концами полюсных накладок. К контактным щеточкам была присоединена внешняя цепь, в которой находился гальванометр. Во время равномерного вращения медного диска наблюдалось неизменное отклонение гальванометра в одну сторону, свидетельствовавшее о генерировании постоянного тока в цепи. Этот прообраз нынешних электромагнитных генераторов в зачаточном виде таил в себе все основные элементы динамомашины. Подобный же тип генератора постоянного тока был изображен на рис. 11 в § 19 Главы III, где мы рассматривали вопрос о применимости фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции в различных частных случаях.

На рис. 122 представлена принципиальная схема современной конструкции дисковой униполярной машины. Здесь M есть магнит особой

формы или электромагнит, возбуждаемый катушками K_1 и K_2. N и S — два полюса этого электромагнита, торцевые поверхности которых симметрично расположены по обе стороны вращающегося медного диска D. При работе машины радиальные элементы диска D непрерывно и вместе с тем строго однообразно пересекают магнитный поток, исходящий из полюса N и входящий в полюс S. Во всех радиальных элементах диска

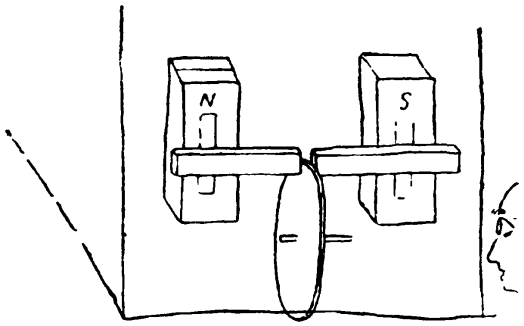


Рис. 121.

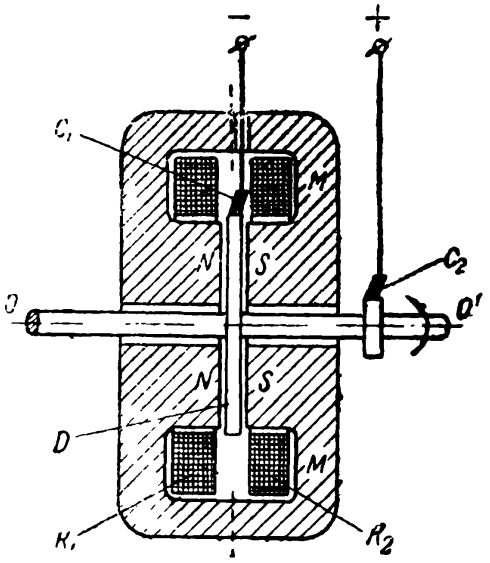


Рис. 122.

будет возникать одна и та же неизменно постоянная электродвижущая сила, если только вращение вала OO', на котором закреплен диск D, совершается с одной и той же угловой скоростью. Щетки C_1 и C_2 трутся о наружный край диска D и о контактное кольцо, насаженное на вал OO'.

в. Во всех случаях сколь угодно длительного индуктирования постоянной электродвижущей силы, осуществляемого при помощи униполярных машин, мы встречаемся, строго говоря, со скрытой коммутацией. Принципиальная необходимость подобной коммутации вытекает из того обстоятельства, что *магнитный поток, пронизывающий контур некоторой неизменяемой электрической цепи, ни при каких физических условиях не может беспредельно возрастать в одном и том же направлении.* А ведь только в этом случае генерируемая в неизменяемом электрическом контуре электродвижущая сила могла бы произвольно длительно сохранять свой знак, т. е. сохранять постоянное направление в течение сколь угодно долгого времени.

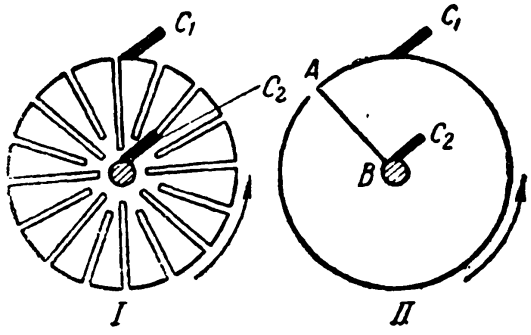


Рис. 123.

На рис. 123 дано пояснение возможных способов рассмотрения указанной скрытой коммутации. Здесь изображены две мыслимые схемы,— *I* и *II*. В обоих случаях надо представить себе, что позади диска расположена торцевая поверхность магнитного полюса, не изображенного на рисунке. Из этого полюса исходят магнитные линии перпендикулярно плоскости диска. На схеме *I*, для более ясного понимания сущности этой схемы, диск показан разделенным воображаемыми прорезами на отдельные радиальные элементы, каждый из которых при вращении

диска последовательно проходит под внешней щеткой C_1. Во время работы дисковой униполярной машины непрерывно сменяются радиальные элементы диска, замыкающие внутреннюю часть электрической цепи между щетками C_1 и C_2. Так можно понимать ту коммутацию, которая по существу происходит в униполярной дисковой машине. Можно, однако, представить себе рассматриваемый процесс коммутации и несколько иначе, а именно согласно схеме *II*. Здесь условно предполагается, что сплошной диск отсутствует. Остается лишь проводящий обод диска с очень узким разрезом у точки A и один только радиальный элемент диска AB, при помощи щеток C_1 и C_2 приключаемый к внешней цепи. Рассуждая применительно к схеме *II*, мы можем считать, что электродвижущая сила, генерируемая дисковой униполярной машиной, индуктируется в результате пересечения главного магнитного потока однообразно вращающимся вокруг вала машины радиальным проводом AB. При этом всё будет происходить так, как будто бы коммутация осуществляется в моменты прохождения разреза у точки A под щеткой C_1. В пределе можно, конечно, предположить, что разрез контактного обода в точке A, бесконечно сужаясь, совсем сомкнется и мы будем иметь сплошное проводящее кольцо, к точке A которого присоединен конец радиального провода AB. И в этом случае скрытую коммутацию мы можем усматривать в процессе повторяющегося перекидывания точки A справа от щетки C_1 налево.

Из двух описанных схем коммутации схема *I* представляется более близкой к действительно происходящему явлению, так как практически во вращающемся органе униполярной машины ток в основном проходит по кратчайшему расстоянию между щетками C_1 и C_2.

О скрытой коммутации мы уже имели случай говорить в § 19 Главы III, когда рассматривали схему, изображенную на рис. 15.

г. Что касается преобразований магнитного потока в процессе электромагнитной индукции, протекающем при генерировании тока в униполярных машинах, то по этому поводу можно высказать следующие соображения. Если для присоединения внешней цепи к вращающемуся органу подобной машины применяются только две щетки C_1 и C_2, т. е. когда мы просто рассуждаем с точки зрения эквивалентных схем, изображенных на рис. 123 (*I* или *II*), — можно ограничиться теми основными представлениями об отпочковании магнитных звеньев от главного магнитного потока, которые были рассмотрены в § 32 Главы IV (рис. 88—90). Дело несколько осложняется в случае применения целой системы щеток C_1, электрически связанных между собой и равномерно распределенных по всей периферии диска. К этому необходимо бывает прибегать, когда от униполярной машины берется ток очень большой силы (десятки тысяч амперов и выше). В пределе можно представить себе даже сплошной контактный орган, снимающий ток со всей окружности наружного края диска (например, сплошной ртутный контакт). И в этом случае первичным моментом в процессе индуктирования тока мы можем считать отпочкование магнитных звеньев, охватывающих отдельные радиальные составляющие диска, которые играют роль большого количества параллельных ветвей, включенных между щеткой C_2 и периферическим контактным органом ($C_1, C_1', C_1'', \ldots$). Однако затем должно следовать сращивание или слияние соседних магнитных звеньев в каждом мыслимом кольцевом их ряде, который охватывает вал, вращающийся вместе с насаженным на него диском. В результате подобного сращивания в пределах некоторого одного ряда образуются два сравнительно больших магнитных звена аналогично схеме, описанной в § 29 (рис.

79—81) и в § 35 (рис. 95). Одно из этих вторичных магнитных звеньев, расположенное по одну сторону диска, где находится щетка C_2, обязательно нанизывается на контур цепи электрического тока, генерируемого машиной, и входит в состав потока самоиндукции данной цепи. Другое же вторичное магнитное звено, расположенное у противоположной стороны диска, где отсутствует щетка C_2, окажется как бы совершенно свободным и о вероятном дальнейшем его поведении можно высказать только некоторые предположения. Быть может, оно должно будет претерпевать те последующие преобразования, которых мы коснемся в Главе VI („Природа электрического тока", §§ 59—61). Вопрос этот остается пока открытым.

д. Применение медного диска в униполярной машине, схематически представленной на рис. 122, влечет за собой довольно значительную величину междужелезного пространства (между полюсами N и S) и магнитного сопротивления в цепи главного потока. Это обусловливает расходование лишних ампервитков возбуждения, которых можно было бы избежать, если бы медный диск был заменен железным. Однако такая, казалось бы, рациональная замена создает большие затруднения в конструктивном отношении, так как при этом необходимо было бы бороться со значительными силами притяжения железного диска к каждому из двух полюсов N и S. Эти противоположно направленные силы были бы скомпенсированны только при условии строгого равенства воздушных промежутков между железным диском и магнитными полюсами, расположенными по обе стороны диска. Для правильного функционирования машины пришлось бы применять на обоих концах вала специальные упорные приспособления, что весьма осложняет конструкцию и делает ее мало надежной.

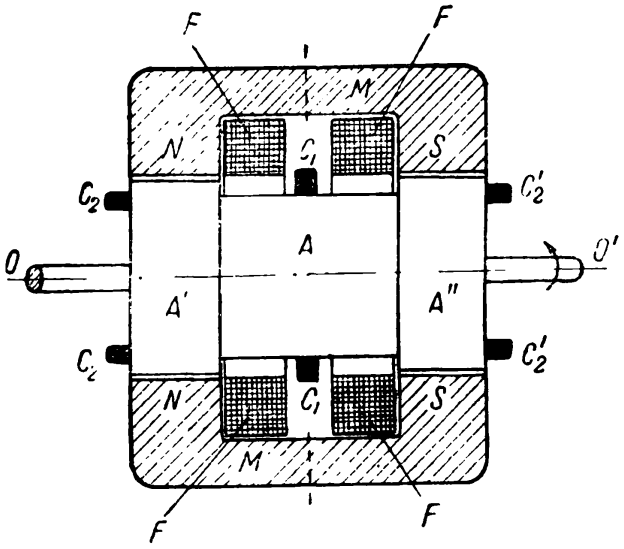


Рис. 124.

Ввиду указанных соображений при построении униполярных машин с железным или стальным вращающимся органом обычно применяется общее расположение, схематически изображенное на рис. 124. Вращающаяся часть $AA'A''$ изготовляется из литой стали и представляет собой основное цилиндрическое тело A с двумя цилиндрическими же концевыми придатками A' и A''. Всё это образует одно сплошное целое. Главный магнитный поток создается магнитом M или электромагнитом, охватывающим со всех сторон вращающуюся часть $A\,A'\,A''$. Для возбуждения электромагнита или, точнее сказать, для соответствующего намагничения всей рассматриваемой системы служат катушки FF, расположенные в полости внутри машины. В этой же полости помещается и серия щеток C_1C_1, равномерно распределенных вокруг среднего пояса цилиндрической части A. Две другие кольцевые же серии щеток C_2C_2 и $C'_2C'_2$ трутся о торцевые поверхности концевых придатков A' и A''. Само собой разумеется, что все щетки, входящие в состав каждой серии, электрически соединены между собой не показанными на рис. 124 проводниками. В такого рода конструкции униполярной машины совер-

шенно устраняются осевые механические усилия, о которых мы выше говорили. Остаются лишь обычные в области динамостроения силы притяжения якоря к цилиндрическим полюсным поверхностям N и S. Массивные медные проводники от серии щеток C_1C_1 выводятся наружу через соответствующие проходные отверстия в кожухе машины (в теле электромагнита M).

Описываемая униполярная машина может, конечно, работать при наличии только одной серии щеток C_2C_2 или $C'_2C'_2$, служащей вторым токособирающим органом кроме серии C_1C_1. Одновременное применение двух серий торцевых щеток C_2C_2 и $C'_2C'_2$ позволяет наиболее полно использовать главный магнитный поток машины и увеличить вдвое генерируемую мощность. Получаются как бы две самостоятельные униполярные машины, спаренные воедино и имеющие общий вал OO', а также общую основную серию щеток C_1C_1. Суммарное междужелезное пространство в магнитной цепи машины можно сводить до минимума, как в обычных коллекторных динамомашинах, и в связи с этим понизить до минимума потребные амперзитки возбуждения.

Представим себе теперь, что оба основных органа рассматриваемой униполярной машины, якорь A и часть M, по существу в равной мере служащие в качестве пути прохождения главного магнитного потока,— изготовлены из одного и того же ферромагнитного материала. Возникает следующий принципиальный вопрос:

Как ведет себя главный магнитный поток при вращении якоря A и остаются ли магнитные линии, его составляющие, совершенно неподвижными в пространстве или же контур каждой магнитной линии, в общем сохраняя свою форму, увлекается якорем A и вращается вокруг оси OO' с той же скоростью?

В первом случае электродвижущая сила, генерируемая униполярной машиной (рис. 124), должна быть рассматриваема в качестве индуктируемой в теле якоря $AA'A''$, вращающегося в неподвижном внешнем магнитном поле, причем местом возникновения этой электродвижущей силы можно считать любой путь перехода сквозь массу якоря от щеток C_1 к щеткам C_2 или C'_2. Последнее обстоятельство непосредственно вытекает из принципа непрерывности магнитного потока.

Во втором случае необходимо считать, что в теле якоря $AA'A''$ не возникает никакой электродвижущей силы, а она генерируется в неподвижном внешнем участке цепи, отходящем от щеток C_1, при пересечении этого участка магнитным потоком, полностью увлекаемым вращающимся якорем.

Однако мыслимо и третье предположение, кажущееся весьма правдоподобным в условиях рассматриваемой электромагнитной системы. Быть может, магнитный поток только отчасти увлекается вращающимся якорем $AA'A''$ и сам вращается вокруг оси OO' с некоторой пониженной скоростью. Если в действительности всё происходит именно так, то в этом третьем случае необходимо будет считать, что генерируемая униполярной машиной электродвижущая сила слагается из двух частей. Одна часть есть электродвижущая сила, индуктируемая в теле вращающегося якоря соответственно скорости перемещения его элементов относительно магнитного потока, который вращается вокруг той же оси OO' с какой-то меньшей скоростью. Другая же часть есть электродвижущая сила, дополнительно индуктируемая во внешнем неподвижном участке цепи вследствие его пересечения магнитным потоком, который проходит через кожух M (рис. 124) и отчасти увлекается вращающимся якорем.

Таким образом, рассматривая процесс индуктирования электродвижущей силы при работе униполярной машины типа, изображенного на рис. 124, мы встречаемся с теми же вопросами, с которыми уже столкнулись раньше в § 17 Главы III, когда касались суждений Фарадея и Престона по поводу поведения магнитного потока, связанного с цилиндрическим магнитом, вращающимся вокруг своей геометрической оси. Окончательного решения указанных вопросов в настоящее время еще нет. Необходимо, однако, иметь в виду, что во всяком случае при расчете униполярной машины величина полной электродвижущей силы, которую можно генерировать при помощи подобной машины, должна получаться неизменно одна и та же совершенно независимо от того, какой точкой зрения мы будем руководствоваться (первой, второй или третьей). Опять-таки подчеркнем, что всё сказанное о расчете электродвижущей силы, генерируемой униполярной машиной, тесно связано с непреложностью принципа непрерывности магнитного потока.

е. Последнее замечание об особых точках зрения Фарадея и Престона, а также всё, что было сказано в § 17 по поводу опытов Фарадея, которые иллюстрировались схематическими рис. 6—8, позволяют высказать некоторые соображения о возможном дальнейшем упрощении

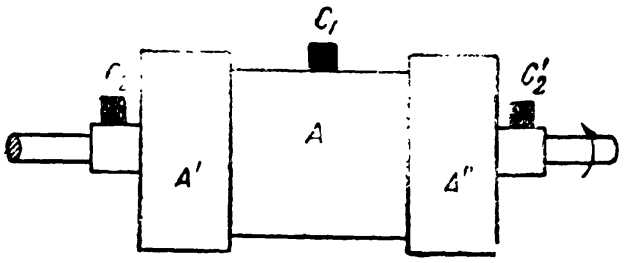


Рис. 125.

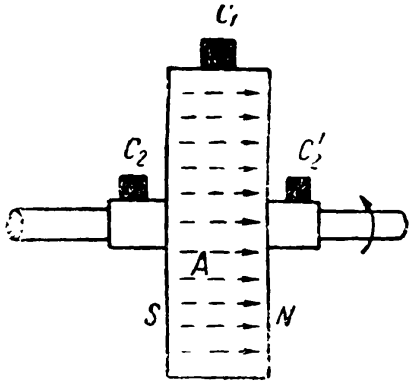


Рис. 126.

конструкции униполярной машины. В этом отношении представляют особенный интерес новые магнитные сплавы, содержащие никель, железо и алюминий. Указанные сплавы отличаются исключительно большой коэрцитивной силой (порядка 600—700 и более эрстедов), т. е. обладают сравнительно очень большой устойчивостью раз сообщенного им магнитного состояния. Есть полное основание ожидать, что ведущиеся в настоящее время исследовательские работы, которые имеют целью добиться значительного повышения остаточной магнитной индукции в сплавах такого рода, приведут к положительным результатам. В таком случае конструкция униполярной машины может быть сведена к одному лишь якорю $AA'A''$ (рис. 124) при условии, что этот якорь будет изготовлен из магнитного сплава с очень большой коэрцитивной силой. Потребуется только предварительно намагнитить такой якорь в осевом направлении. В виду того, что торцевые поверхности якоря при данных условиях в значительной степени могут играть роль полюсных поверхностей, целесообразно будет боковые щетки C_2 и C_2' накладывать на осевые придатки, надлежащим образом выполненные (рис. 125). Мыслимо, наконец, и дальнейшее упрощение конструкции униполярной машины, представленное на рис. 126, где A есть сравнительно короткий цилиндр из специальной магнитной стали, сильно намагниченный в осевом направлении, как показано пунктирными стрелками. В этом случае мы будем иметь полностью воспроизведенной схему чрезвычайно важного опыта

Фарадея с магнитом, вращающимся вокруг своей геометрической оси (§ 17, рис. 8). Униполярная машина, доведенная таким образом до предельной простоты, теоретически говоря, может генерировать сколь угодно сильные токи в случае достаточно больших размеров вращающегося тела A. При этом, конечно, будет развиваться сравнительно небольшое напряжение, вообще характерное для всяких униполярных машин.

Само собой разумеется, что токособирающие органы, представленные на рис. 126 в виде одиночных щеток C_1, C_2 и C'_2, приходится сильно развивать, когда машина предназначается для получения значительных токов. Простейший способ решения этой задачи заключается в применении целых серий однотипных щеток C_1, C_2 и C'_2, как мы уже указывали при описании униполярной машины, изображенной на рис. 124. Вообще конструкция токособирающих устройств в униполярных машинах, рассчитанных на очень большую нагрузку, представляет не мало затруднений, и до настоящего времени нет еще вполне удовлетворительного решения данной технической задачи. Повидимому, в этом отношении необходим переход к каким-то новым приемам, отличающимся от того, что принято в обычных коллекторных машинах. Между прочим, следует иметь в виду, что в униполярных машинах, быть может, окажется весьма целесообразным применение жидкостных токособирающих устройств, основанных на использовании ртутного контакта, например в форме большого количества параллельно работающих ртутных струй. Попытки сконструировать униполярную машину с ртутным токособирающим устройством были сделаны уже давно (Б. И. Угримов), но не были доведены до полного и окончательного решения этой проблемы. Необходимо отметить, что конструирование удовлетворительно работающего ртутного контакта значительно облегчается в том случае, когда вращающийся орган изготовлен из стали, так как подобного рода материал вообще очень мало подвержен коррозирующему действию ртути. Во всех случаях применения ртутноструйных токособирающих органов в униполярных машинах несомненно можно при помощи специального кожуха, весьма плотно закрывающего всю машину, добиться совершенного устранения вредных влияний на здоровье обслуживающего персонала со стороны ядовитых ртутных паров.

§ 44. Примеры ошибочной конструкции униполярных машин

а. Мы уже указывали, что униполярная машина практически может развивать сравнительно небольшую электродвижущую силу, обычно не превышающую нескольких десятков вольтов. Только путем применения предельно высоких скоростей вращения и только ценою механического перенапряжения материала, из которого изготовлены вращающиеся органы подобного рода машин, мыслимо генерировать электродвижущие силы порядка 100 или немногим более вольтов. В то же время отсутствие в униполярных машинах явной коммутации, а также такого ответственного и требующего внимательного ухода органа, как коллектор, делает весьма заманчивой идею о том, чтобы построить динамомашину постоянного тока на любые потребные для электротехнической практики напряжения, исходя из принципа униполярной машины, а именно сообщая некоторому проводнику или проводникам однообразное движение относительно одного и того же магнитного полюса, т. е. в магнитном поле неизменного направления. Поэтому неоднократно делались попытки

сконструировать униполярную машину с более сложным вращающимся органом, чем то, что было описано в § 43. Попытки такого рода особенно активировались в последнее время в связи с выяснившейся целесообразностью использования постоянного тока в случаях высоковольтной передачи энергии.

Различными изобретателями были предложены конструкции униполярной машины на напряжения до 100,000 вольтов. Изобретатели при этом полагали, что для генерирования столь высоких напряжений возможно будто бы применить в якоре специальную обмотку, состоящую из длинного изолированного проводника, уложенного таким особенным способом, чтобы одинаково направленные электродвижущие силы, индуктируемые в некоторых участках этого проводника, складывались одна с другой и в сумме давали требуемое высокое напряжение. Для того же, чтобы устранить противоположно направленные электродвижущие силы, возникающие в других участках данного проводника, считалось возможным и достаточным применить соответствующую магнитную экранировку. Полная несостоятельность и принципиальная ошибочность подобных проектов должны быть совершенно очевидными после всего того, что было выше изложено по поводу роли магнитного экранирования проводников (см. § 42).

6. Для иллюстрации сказанного рассмотрим прежде всего рис. 127, на котором в самом обобщенном виде представлена схема, по существу своему встречающаяся во всех несбыточных проектах униполярных машин на очень высокое напряжение. Здесь *NN* есть торцевая поверхность некоторого магнитного полюса (в данном случае — северного). Вокруг оси, перпендикулярной к этой поверхности, может вращаться плоская обмотка, в состав которой авторы проектов вводят достаточно большое число витков, образующих всю арматуру униполярной машины. В виде примера на рис. 127 изображены лишь три витка. Концы обмотки, само собой разумеется, присоединены к двум контактным кольцам. При данных условиях активными в процессе электромагнитной индукции будут, конечно, только радиальные элементы вращающейся обмотки, которые непрерывно пересекают магнитные линии, исходящие из полюса *NN*. Предполагают, что для получения требуемого эффекта окажется достаточным как-либо заэкранировать от внешнего магнитного поля одну половину этих радиальных участков сплошного проводника. Подобный магнитный экран показан в форме железной трубы *T*, сквозь которую проходят соответствующие участки витков. Обычно ожидается, что ввиду ослабления магнитного поля внутри железной трубы эти участки проводника не будут активными в отношении электромагнитной индукции или, вернее сказать, почти не будут активными. Следовательно, в замкнутой цепи обмотки якобы будут действовать только (или почти только) электродвижущие силы, генерируемые в незаэкранированных частях обмотки. Однако при этом не учитывается всё то, о чем шла речь в § 42, где доказывалась полная невозможность ослабить суммарный индуктивный эффект какими бы то ни было магнитными экранами. Схема, представленная на рис. 127, очень напоминает порочную схему электромагнитного тахометра (см. рис. 119). В обоих случаях принцип непрерывности магнитного потока совершенно опрокидывает все ожидания изобретателей. Полная электродвижущая сила в непрерывном контуре обмотки, которая однообразно перемещается в магнитном поле неизменного направления и неизменной интенсивности, принципиально должна быть равна нулю, как бы мы ни изощрялись в использовании магнитной экранировки отдельных частей этой обмотки.

в. В качестве второго, частного примера ошибочной конструкции униполярной машины, рассчитывавшейся на значительное напряжение, рассмотрим схематический чертеж подобной машины, изображенный на рис. 128 в двух проекциях. Здесь D представляет собой диск, составленный из листового железа и могущий вращаться вокруг оси, проходящей через центр. В диске имеется кольцевой ряд отверстий, сквозь которые пропускаются „экранируемые" участки непрерывного изолированного проводника, образующего большое количество витков. Внешние открытые участки этих витков по возможности равномерно распределены по боковой цилиндрической поверхности диска D. Концы обмотки присоединены к двум контактным кольцам, с которых ток снимается неподвижными щетками. Описанная арматура расположена в поле магнита или электромагнита, как показано на рис. 128. Магнитные линии, исходящие из северного полюса N, который охватывает часть боковой поверхности арматуры, проходят через междужелезное пространство

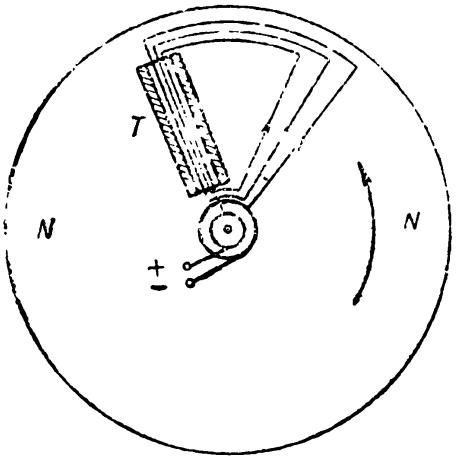


Рис. 127.

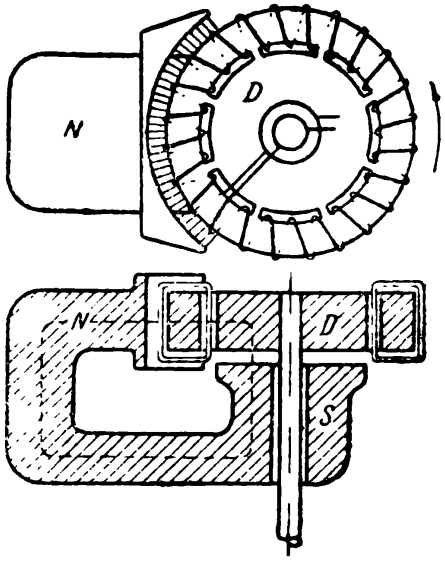


Рис. 128.

и затем пронизывают тело диска D, направляясь из него в торцевую поверхность полюса S, расположенную против центральной части диска, где нет никаких проводников. По причине большой магнитной проницаемости железа магнитные линии должны замыкаться главным образом через сплошные части диска D. Следовательно, элементы обмотки, проходящие сквозь ряд отверстий в диске, окажутся в очень слабом магнитном поле, т. е. будут заэкранированы. Поэтому при расчете такой машины изобретатель ошибочно принимал во внимание только элементы обмотки, лежащие непосредственно против полюса N, предполагая, что в проводниках, проходящих сквозь отверстия в железном диске D, якобы не будет индуктироваться никакой или почти никакой электродвижущей силы.

Осуществление рассмотренной машины на практике жестоко обмануло ожидания изобретателя. Построенная машина, вместо расчетной постоянной электродвижущей силы, которая должна была, казалось бы, достигать значительной величины (порядка сотен вольтов), давала лишь ничтожную переменную электродвижущую силу (порядка десятых долей вольта). Для нас должно быть ясно, что иных результатов и нельзя было ожидать так как ослабление магнитного поля в экранирующих отверстиях железного диска D происходит только вследствие перераспределения главного магнитного потока, а не за счет какого-либо уменьше-

ния его полной величины. Принцип замкнутости магнитного потока приводит нас к заключению, что применение экрана ни в малейшей степени не изменяет числа магнитных линий, пересекаемых проводником за время одного оборота арматуры. Элементы обмотки, проходящие сквозь экранирующие отверстия, за время одного оборота диска D пересекут в точности такое же количество магнитных линий (см. § 42), как и участки проводника, расположенные вне указанных отверстий и перемещающиеся в магнитном поле между полюсом N и боковой поверхностью железного диска. Таким образом, в контуре проводника, образующего обмотку якоря описываемой униполярной машины, возникают две серии электродвижущих сил, в основном равные по суммарной величине, но обратные по направлению. Что же касается возникновения ничтожно малой переменной электродвижущей силы, то это объясняется, с одной стороны, не абсолютно строгой симметрией всей вращающейся системы по отношению к оси вращения, и с другой стороны — наличием отверстий в диске D, число которых в секторе, обращенном к полюсу N, во время вращения претерпевает периодические колебания. Всё это, вместе взятое, естественно обусловливало известные незначительные пульсации магнитного сопротивления на пути потока, а потому слабо пульсировал и самый магнитный поток. Указанное обстоятельство, конечно, и было непосредственной причиной индуктирования очень незначительной переменной электродвижущей силы.

г. Мы рассмотрели сравнительно простые примеры устройства униполярных машин, которые якобы могут развивать значительные электродвижущие силы. Необходимо отметить, к сожалению, что до самого последнего времени всё еще встречаются изобретатели подобных машин. Нередко предлагают столь сложное расположение всех частей машины, что иногда даже опытному электрику бывает трудно в нем разобраться и найти ошибку, не сразу бросающуюся в глаза. Однако руководствуясь принципом непрерывности магнитного потока, в конце концов всегда удается вскрыть эту ошибку и выяснить полную несостоятельность той или иной предложенной конструкции.

Можно утверждать, что все проекты униполярных машин, имеющие целью генерирование постоянного тока повышенного или высокого напряжения и основанные на использовании магнитной экранировки проводников, принципиально порочны и заранее обречены на неудачу. *Основные законы природы непреложны и ненарушимы. Как-либо обойти эти законы разного рода конструктивными ухищрениями невозможно.*

Итак, можно следующим образом резюмировать всё вышеизложенное:

1. Принцип непрырывности магнитного потока должен строго учитываться при всяком рассмотрении процессов электромагнитной индукции.

2. Никакими конструктивными особенностями электромагнитного генератора невозможно достигнуть сколь угодно длительного индуктирования электродвижущей силы постоянного направления в неизменяемом контуре.

3. Во всех случаях электромагнитного генерирования постоянного тока должен иметь место процесс коммутации. В явной форме это происходит в обычных коллекторных динамомашинах постоянного тока, в неявной форме — в униполярных машинах.

4. *Проблема построения униполярной (бесколлекторной) машины со сложной арматурой для получения очень больших электродвижущих сил неизменно постоянного направления, т. е. проблема динамо-*

машины постоянного тока без всякой коммутации, принципиально неразрешима. Все попытки конструирования такой динамомашины основаны на игнорировании непрерывности магнитного потока и на грубо формальном понимании закона электромагнитной индукции.

§ 45. К вопросу о генерировании постоянного тока в процессе электромагнитной индукции

После рассмотрения примеров ошибочной конструкции униполярных машин, предназначенных для получения постоянного тока повышенного или высокого напряжения, весьма получительно будет остановить внимание еще на одной, также ошибочной, попытке построения бесколлекторной машины постоянного тока, основанной на принципе синхронного изменения самоиндукции.

Изобретатели подобной машины предполагали, что в цепи, питаемой от обычного генератора переменного тока, можно следующим образом обеспечить получение составляющей постоянного тока. Известно, что

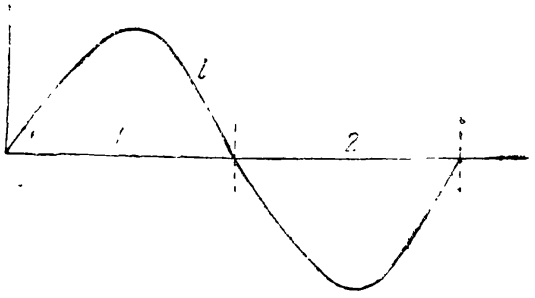


Рис. 129.

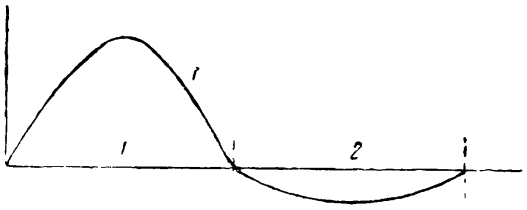


Рис. 130.

чем больше самоиндукция цепи, тем сильнее запаздывает момент достижения максимума тока, соответствующего данной постоянной электродвижущей силе. Известно также, что в обычных цепях переменного тока с неизменным сопротивлением и с неизменным коэффициентом самоиндукции кривая тока имеет симметричный характер (рис. 129), причем количество электричества, протекающего по цепи за время какого-либо полупериода *1*, в точности равно по абсолютной величине количеству электричества, протекающему в обратном направлении в течение смежного полупериода *2*, и т. д. Некоторые изобретатели, рассуждая в высокой степени примитивно, выводят заключение, будто бы достаточно обеспечить неравенство коэффициентов самоиндукции данной цепи, соответствующих полупериоду *1* и полупериоду *2*, например делать коэффициент самоиндукции на время 2-го полупериода очень большим, и тогда ток, протекающий за этот полупериод, будет в общем значительно ослаблен по сравнению с током за 1-й полупериод, как это предположительно показано на рис. 130 (на этом рисунке и на рис. 129 ради упрощения пренебрегаем высшими гармониками). В таком случае переменный ток будет несимметричным, и в нем появится составляющая постоянного тока, так как количества электричества, поочередно протекающие по противоположным направлениям, якобы окажутся теперь неодинаковыми.

Практически делались попытки строить особые машины, в которых на валу обычного альтернатора помещалась вращающаяся часть специального вариометра самоиндукции, благодаря чему достигалось синхронное изменение индуктивности всей цепи, включавшей в себя и этот вариометр.

Опыт, конечно, не оправдал ожидания изобретателей. Это можно было заранее предвидеть, не прибегая к детальному математическому обследованию случая синхронного изменения самоиндукции в цепи переменного тока. Дело в том, что полная электродвижущая сила, индуктируемая в рассматриваемой цепи, будет слагаться из основной электродвижущей силы, генерируемой в альтернаторе, и из электродвижущей силы, обусловленной индуктивностью цепи, т. е. можем написать следующее соотношение:

$$\sum e = E_m \sin \omega t - \frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\Phi_0}{dt} - \frac{d\Phi_s}{dt} = -\frac{d(\Phi_0 + \Phi_s)}{dt},$$

где Φ_0 есть число сцеплений главного магнитного потока в альтернаторе с обмоткой его арматуры, а Φ_s — число сцеплений потока самоиндукции со всей цепью. Это соотношение должно быть справедливо совершенно независимо от того, изменяется ли синхронно коэффициент самоиндукции L, или он изменяется как-либо асинхронно, или же, наконец, он всё время сохраняет свою величину строго неизменной. При установившемся режиме в цепи переменного тока Φ_0 и Φ_s будут лишь периодически и синхронно менять свою величину в одних и тех же конечных пределах. В подобных же конечных пределах будет периодически меняться и сумма $\Phi_0 + \Phi_s$, попеременно достигая положительного максимального значения, которое можно обозначить через $+\Phi_m$, и затем отрицательного максимума $-\Phi_m$. Таким образом, полный магнитный поток, сцепляющийся с контуром рассматриваемой цепи, периодически будет изменяться в одну сторону на величину $2\Phi_m$ и после этого — в другую сторону на ту же самую величину и т. д. Принимая во внимание, что электрическое сопротивление цепи в данном случае мы считаем неизменным, т. е. имеем

$$r = \text{Const},$$

и исходя из основного положения, установленного опытами Фарадея (см. § 18 Главы III), можем утверждать, что за время одной части периода переменного тока по цепи протечет количество электричества, по абсолютной величине равное

$$\frac{2\Phi_m}{r},$$

а затем за время другой части периода точно такое же количество электричества протечет в обратном направлении. Следовательно, средняя сила тока за время полного периода будет равна нулю и никакой составляющей постоянного тока не будет обнаруживаться в цепи.

При синхронном изменении коэффициента самоиндукции цепи мы можем получить лишь искажение формы или даже нарушение симметрии кривой переменного тока. Характер этой диссимметрии будет зависеть от закона изменения коэффициента самоиндукции, но площади кривой тока за время положительной и отрицательной пульсаций тока, т. е. количества электричества, протекающие в ту и другую сторону за время полного периода, будут в этом случае в точности равны по абсолютной величине и обратны по знаку. Предположения, на которых основано построение кривой, показанной на рис. 130, принципиально ошибочны.

Из всех разобранных выше примеров ясно, что ни магнитное экранирование, ни применение синхронно изменяющейся индуктивности цепи не дают возможности получить в электрически неизменном контуре

составляющую постоянного тока или постоянную электродвижущую силу. Для возбуждения в подобном контуре некоторой индуктированной электродвижущей силы, постоянной по величине и направлению, необходимо было бы длительно поддерживать неизменными условия пересечения частей этого контура магнитными линиями, однообразно входящими внутрь контура извне или выходящими из контура наружу. В обоих случаях это эквивалентно беспрерывному и беспредельному увеличению охватываемого контуром магнитного потока того или иного направления, что физически невозможно, как мы указывали выше. Практически, имея какой-либо виток проволоки или несколько витков проволоки, мы можем увеличивать магнитный поток, пронизывающий эти витки, только до известных пределов. За это время в витках будет индуктироваться электродвижущая сила некоторого определенного направления. После этого, желая продолжать процесс индуктирования электродвижущей силы, мы располагаем только возможностью начать изменение охватываемого витками магнитного потока в другом направлении, в связи с чем индуктируемая электродвижущая сила, перейдя через нулевое значение, возникнет в направлении, обратном тому, что было раньше и т. д. Иными словами, мы можем длительно индуктировать в данных витках только электродвижущую силу переменного направления. Соответственно этому по рассматриваемым виткам, приключенным к какой-либо внешней цепи, потечет переменный ток. Так оно практически и происходит в обычных альтернаторах. Для того же, чтобы получить во внешней цепи ток постоянного направления, как известно, приходится применять специально выпрямительное устройство, называемое коммутатором или коллектором. Именно так и строятся обычные (коллекторные) динамомашины постоянного тока.

Закон электромагнитной индукции, особенно в основной формулировке Фарадея, с совершенной очевидностью указывает, что в электрически неизменяемом контуре, пользуясь явлением электромагнитной индукции, можно получить постоянный ток — или, точнее сказать, составляющую постоянного тока — только путем применения синхронного изменения электрического сопротивления цепи. В таком случае за время некоторого полупериода переменной электродвижущей силы по цепи будет протекать большее количество электричества, чем за время смежного полупериода, и средний ток за полный период не будет равен нулю, в отличие от того, что оказывается в случае, когда при постоянном сопротивлении претерпевает синхронные изменения лишь индуктивность цепи. На практике широко пользуются методом синхронного изменения сопротивления. Существует целый ряд систем выпрямителей (например, ртутные, синхронно-контактные и т. п.). В настоящее время повсюду ведутся предварительные исследования по применению постоянного тока для высоковольтных линий передачи энергии. В этом отношении особенно пригодными оказываются разного рода ионные и электронные выпрямители. Использование более или менее сложных схем, питаемых многофазными токами, дает возможность накладывать одна на другую сдвинутые во времени пульсации тока, выпрямляемого в каждой из фаз. В результате удается получать во внешней цепи (в линии передачи, например) ток постоянного направления при почти неизменной его силе.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 46. К постановке вопроса о природе электрического тока

История науки изобилует примерами преходящих стадий в понимании явлений окружающего нас мира. Непрерывно, в процессе накопления новых фактов и длительной работы научной мысли, наши представления подвергались метаморфозе, последовательно освобождаясь от всего, не выдерживающего строгой критики, и постепенно рафинируясь в смысле возможно большего приближения к соответствию с тем, что происходит в действительности. Так, птоломеева система мира уступила место системе гелиоцентрической. Учение древних философов о четырех основных началах — стихиях: воздухе, воде, земле и огне — прошло путь долгой эволюции. В связи с этим можно, между прочим, помянуть многочисленные упорные искания алхимиков, приведшие к накоплению ряда новых конкретных данных о веществе, и мучительные блуждания человеческой мысли, стремившейся постигнуть энергетическую сторону явлений природы и делавшей на этом пути не мало ложных шагов, вроде, например, увлечения теорией флогистона. Наконец, благодаря развитию химии и физики, древнее, кажущееся теперь наивным учение о четырех основных стихиях, трансформировалось в наши современные знания о строении вещества и о его превращениях, связанных с энергетическими процессами, вообще, и тепловыми, в частности. Представление об атоме, как о последней далее неделимой частице вещества благодаря ряду великих открытий, имевших место в самое последнее время, заменилось картиной целого микрокосмоса, сложное строение и законы которого теперь так напряженно изучаются учеными всего мира. Физическая реальность, называемая электрическим зарядом, понимается в наши дни несколько иначе, чем 100 лет тому назад. Даже в самые последние годы произошли заметные сдвиги в этом отношении. Магнитная масса (магнитная жидкость), считавшаяся некогда подлинною физическою реальностью, в настоящее время рассматривается лишь как некоторая фикция, имеющая чисто вспомогательное значение при математическом изучении свойств магнитного поля.

Во всяком случае несомненно, что и наши современные физические представления в ближайшем будущем претерпят изменения как в отношении формы, так и в отношении содержания, непрерывно преодолевая преходящие стадии познания и приобретая всё бóльшую и бóльшую степень совершенства.

При описании разного рода явлений мы нередко пользуемся терминологией, исторически сложившейся в условиях недостаточно полного по-

нимания природы этих явлений. По инерции мы продолжаем обычно применять подобную терминологию и тогда, когда общий прогресс знаний уже с очевидностью свидетельствует о том, что она в значительной степени не соответствует действительности. В целом ряде случаев от этого не происходит никаких недоразумений. Мы, например, говорим „солнце всходит и заходит", „звезды мерцают" и т. д. и т. п., отдавая себе полный отчет в том, что это нам только так кажется. При быстрой езде в безветренную погоду мы, пользуясь обычным языком, говорим „ветер дует нам в лицо", и это нисколько не мешает нам совершенно ясно понимать, о чем идет речь. Иногда, однако, старая привычная терминология как бы гипнотизирует нас, удерживая во власти ошибочных точек зрения, и таким образом тормозит правильную оценку вновь открываемых фактов и задерживает переход на новую ступень более правильного понимания того или иного явления. В этом отношении один из наиболее ярких примеров мы имеем в случае электромагнитного процесса, называемого *электрическим током.*

„Из двух предположений, весьма обычно принимаемых в настоящее время, о магнитных жидкостях и об электрических токах, первое необходимо признать ошибочным, а быть может и *оба* ошибочны..."[1] Это суждение было высказано Фарадеем еще в 1854 г. в результате тщательного анализа всего известного ему из области электромагнитных явлений. Однако многое из того, что совершенно отчетливо было разъяснено Фарадеем и затем воспринято его последователем Максвеллом, до настоящего времени недостаточно оценено и, вообще говоря, не нашло себе полного отражения в дальнейших работах ряда других физиков. В то же время следует признать, что накопление новых опытных материалов (открытие сверхпроводимости и т. д.) диктует настоятельную необходимость, так сказать, реконструировать наши представления об „электрическом токе" и попытаться вложить в этот старый термин новое содержание, более соответствующее совокупности современных научных достижений.

Кинетический характер процесса, имеющего место в цепи всякого электрического тока, безусловно признается всеми. Это обстоятельство является связующим звеном между отдельными точками зрения по вопросу о природе тока. Разногласия существуют лишь по поводу того, что́ именно движется и как движется.

В первоначальной стадии представление об электрическом токе ограничивалось утверждением, что по проводнику течет „электричество". При этом речь шла исключительно о том, что происходит внутри проводника. С этой точки зрения сущность электрического тока состоит в движении электричества внутри проводника, в протекании его через любое поперечное сечение проводника. Указанное представление о природе тока наложило отпечаток на всю терминологию, которою мы пользуемся при описании явлений электрического тока. Рассматриваемая точка зрения выработалась и царила безраздельно в то время, когда электричество мыслилось в качестве некоторой подвижной жидкости. Предполагалось, кроме того, что электрическая жидкость, сосредоточенная в одном месте, может как-то взаимодействовать через абсолютно пустое пространство с другой порцией электрической жидкости, сосредоточенной на некотором расстоянии где-либо в другом месте. Как известно, представление об электрической жидкости претерпело целую эволюцию, и в конце концов наука остановилась на признании двух якобы само-

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, Vol. III. 3303 (курсив Фарадея).

стоятельных видов электричества (положительное и отрицательное электричество). Учение об электрических жидкостях в своей примитивной форме совсем не считалось с чем бы то ни было вне объема, занятого „электричеством". Соответственно этому и при изучении процесса электрического тока сначала не усматривалось ничего характерного в пространстве, окружающем проводник, по которому течет ток. Эта ошибочная точка зрения до некоторой степени удержалась и в общих установках современной электронной теории.

Основные исследования Фарадея обратили внимание на особенное значение промежуточной среды во всех электрических и магнитных явлениях. Стало ясно, что электрическая жидкость, электрическая масса или электрический заряд представляют собой лишь одну сторону того, что́ можно назвать электрическим состоянием какой-либо системы и что́, вообще говоря, необходимо рассматривать как неделимую совокупность, частями которой являются специфические процессы в диэлектрике и электрический заряд. С точки зрения Фарадея и Максвелла, электрический заряд представляет собой не что иное, как границу указанных специфических процессов в диэлектрике, или, вернее сказать, центр, вокруг которого диэлектрическая среда находится в каком-то особом состоянии.

В то же время работы Фарадея и Максвелла утвердили признание исключительной роли среды в области магнитных явлений и выявили совершенную условность старых представлений о магнитных жидкостях или магнитных массах. Как-раз в течение первого периода научной деятельности Фарадея был сделан ряд важных открытий, направивших научную мысль к рассмотрению того, что происходит в пространстве вокруг проводника с током. В 1820 г. Эрстед открыл влияние тока на расположенную вблизи магнитную стрелку. Затем последовал целый ряд наблюдений и исследований (Араго́, Ампера, Фарадея и др.), обогативших науку новыми достижениями. Наконец, в 1831 г. первый этап изучения магнитного поля тока завершился открытием электромагнитной индукции тока. Все эти открытия показали, что магнитное поле вокруг проводника, по которому идет электрический ток, представляет собой не какое-либо привходящее обстоятельство, не имеющее принципиального значения и наблюдаемое лишь в некоторых случаях, но есть неотъемлемая часть всякого электрического тока.

С полной достоверностью необходимо утверждать, что никогда и ни при каких условиях не бывает такого электрического тока, который не сопровождался бы магнитным полем.

Электрический ток, протекающий по некоторой замкнутой цепи, может не сопровождаться выделением джоулева тепла, может быть не связан с какими-либо разностями потенциалов между отдельными точками цепи (случай сверхпроводящей цепи). Ток может не сопровождаться никакими электролитическими действиями и, вообще, никакими так называемыми „внутренними" действиями. Возможен, наконец, и такой случай, что при прохождении тока не происходит каких бы то ни было движений ионов, электронов и т. п. (случай тока электрического смещения в „пустоте"). Однако в настоящее время совершенно нельзя представить себе электрический ток без соответствующего ему магнитного поля. Во всяком случае в высокой степени вероятно, что ток есть явление электромагнитного характера, протекающее и вне того объема, который непосредственно заполнен частями электрической цепи, т. е. явление, выходящее за пределы указанного объема и, повидимому, распространенное по всему пространству, где наблюдается магнитное

поле тока. Таким образом, при обсуждении вопроса о том, где же происходит особое движение, позволяющее трактовать электрический ток в качестве явления кинетической природы, внимание исследователей естественно должно быть обращаемо также и в направлении пространства вокруг проводника.

Максвелл, особенно обстоятельно анализировавший многие следствия, вытекающие из признания кинетической природы тока, и опиравшийся при этом на идеи и опыты Фарадея, между прочим так говорит по поводу движений электромагнитного характера, которые происходят в системе токов (рассматривается случай двух токов): „... Эта движущаяся материя, какова бы она ни была, не ограничивается объемом проводников, несущих два тока, но, вероятно, простирается по всему пространству, окружающему их".[1] Сам Фарадей, относившийся с большою осторожностью к термину „электрический ток", основанному на представлении об электрических жидкостях, склонен был видеть в проводнике, несущем ток, некоторую „ось" — „axis of power".[2] Выражаясь современным языком и стремясь возможно точнее придерживаться подлинного смысла, вкладываемого Фарадеем в слова „axis of power", мы можем сказать, что он несомненно имел в виду *ось энергетических процессов, совершающихся в цепи тока*, — ту ось, вокруг которой известным образом ориентированы электрические и магнитные силы, действующие в цепи. В высокой степени примечательно еще следующее обстоятельство. Открывший законы электролиза и тем самым, казалось бы, давший убедительное доказательство тому, что представление о движении электричества внутри проводника с током имеет непосредственное отношение к действительности, Фарадей всё же устремляет свой взор в пространство, окружающее проводник, когда в связи с явлениями электромагнитной индукции ищет ответа на вопрос об основных и наиболее характерных свойствах электрического тока. В какой степени отчетливо он сознавал необходимость внести исправления в обычное понимание термина „электрический ток", ярко свидетельствует приведенное выше суждение его о вероятной *ошибочности* привычных представлений, относящихся к этому физическому явлению.

Все современные достижения науки об электромагнитных явлениях в полной мере подтверждают ту основную мысль, что в случае электрического тока кинетический процесс не ограничивается объемом проводника с током, но происходит и в пространстве, окружающем этот проводник. Даже более того, можно считать совершенно достоверным, что при распространении энергии тока по проводам и, в частности, при электрической передаче энергии — главнейшую роль играет то движение, которое происходит в диэлектрике вокруг проводов. Передаваемая энергия течет вдоль проводов снаружи их, но не внутри проводов. То движение электричества в форме электронов, которое при этом несомненно имеет место внутри проводников и которое находится в самой тесной связи с электромагнитным процессом в целом, в отношении передачи электрической энергии, надо полагать, само по себе не играет никакой роли.

Приходится, таким образом, констатировать вполне определенно, что до настоящего времени, когда многочисленные применения электрической энергии получили уже самое широкое распространение и вместе с тем теория электромагнитных явлений достигла, вообще говоря, вы-

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. II, § 572.

[2] Faraday. Experimental Researches in Electricity. Vol. I, 517, 1627, 1642, Vol. III, 3269.

сокой степени совершенства, во всей своей остроте продолжает стоять вопрос:

Что именно представляет собой электрический ток?

§ 47. Обоснования электродинамики Максвелла

При общем рассмотрении вопроса о природе электрического тока можно почерпнуть весьма ценные руководящие указания из вводной части электродинамики Максвелла, посвященной анализу основных свойств тока. В этом же отношении представляют значительный интерес и главнейшие результаты, которые он получил, развивая свое учение о силах, возникающих во всякой системе токов.

Путь умозаключений, пройденный Максвеллом, состоял в следующем. Как было уже указано, электрический ток есть явление кинетического характера. Таким образом, система проводников, по которым текут электрические токи, может быть рассматриваема, с самой общей точки зрения, в качестве совокупности частей, обладающих кинетической энергией как вследствие некоторых специфических движений, свойственных электромагнитному процессу, так и в связи с возможными движениями обычных материальных масс, т. е. в связи с пространственным перемещением самих проводников. К такой системе, согласно Максвеллу, возможно применить уравнения механики в их наиболее обобщенной форме, и это позволяет получить выражения для всех электродвижущих сил, возникающих в системе, а также для всех проявляющихся в ней сил механического характера.

Обоснование этой точки зрения содержится в Главах IV и VI второго тома максвелловского „Трактата об электричестве и магнитизме“.[1]

Мы приведем ниже в переводе несколько особенно интересных отрывков из этого трактата. Сделать это необходимо, с одной стороны, потому, что чрезвычайно поучительно проследить ход развития идей Максвелла, одного из величайших мастеров теоретического анализа физических явлений. С другой стороны, никакое переложение не может заменить подлинных формулировок и высказываний Максвелла, являющихся классическими по глубине содержащихся в них мыслей и по удивительной точности выражения всех оттенков этих мыслей.

Главу IV второго тома своего трактата Максвелл начинает с описания некоторых явлений, наблюденных Фарадеем, а также другими физиками, и хорошо нам теперь известных в качестве явлений самоиндукции. Максвелл подчеркивает, что эти явления свидетельствуют о присущем электрическому току „количестве движения“ или „инерции“. Для пояснения своей мысли он пользуется аналогией с движением воды в трубе, строго устанавливая вместе с тем границы этой аналогии.

Обратимся к извлечениям из Главы IV второго тома трактата Максвелла:

„546. Девятую серию своих исследований Фарадей посвятил рассмотрению группы явлений, имеющих место при прохождении тока по проволоке, образующей катушку электромагнита.

Дженкин заметил, что хотя непосредственным действием вольтаической системы, состоящей только из одной пары пластин, невозможно произвести чувствительный физиологический удар, но если заставить ток проходить через катушку электромагнита

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. II.

и размыкать цепь, держа в руках соответствующие концы проволок, то ощущается сильный удар. При замыкании цепи подобного удара не замечается.

Фарадей показал, что это и другие описываемые им явления вызваны тем же самым индуктивным действием тока, которое он ранее наблюдал в отношении соседних проводников. В этом случае, однако, ток производит индуктивное действие на тот же проводник, по которому он сам течет, и оно оказывается тем более сильным, что именно этот проводник находится ближе к различным элементам данного тока, чем какой-либо другой проводник.

547. Он отмечает, однако,[1] что „первая мысль, которая приходит в голову, это — что электричеству, циркулирующему по проволоке, присуще нечто подобное количеству движения или инерции". В самом деле, когда мы рассматриваем отдельный проводник, явление совершенно аналогично тому, что происходит в трубе, заполненной непрерывно текущим потоком воды. Если при этом быстро закрыть конец трубы, то инерция воды создает внезапное повышение давления, которое сделается значительно больше гидростатического и может оказаться достаточным, чтобы разрушить трубу.

Если при закрытии главного выхода вода имеет возможность вытекать через какое-нибудь узкое отверстие, она проникнет сквозь него со скоростью значительно большей, чем скорость, определяемая гидростатическим давлением, и если воде открывается путь через клапан в какую-либо камеру, то она проникнет в эту камеру, даже если давление в последней выше гидростатического давления в трубе.

На этом принципе строится гидравлический таран, посредством которого малое количество воды может быть поднято на большую высоту с помощью большого потока невысокого напора.

548. Эти проявления инерции жидкости в трубе зависят лишь от количества жидкости, протекающей по трубе, длины и поперечного сечения трубы на различных ее участках. Они не зависят от чего-либо, находящегося вне трубы, так же как и от формы, которую можно придать трубе при условии сохранения ее длины.

Иначе обстоит дело в случае проводника, несущего ток: если длинный проводник сложен вдвое, то получаемый эффект очень слаб; если обе части проводника раздвинуты, то он сильнее; если проводник навит в виде спирали, он еще сильнее, а самый сильный эффект получается, когда внутрь свитого в спираль проводника помещен кусок мягкого железа.

Кроме того, когда на первый проводник навит второй, изолированный от него, то, если второй проводник не образует замкнутой цепи, явление происходит как и в предыдущем случае; если же второй проводник образует замкнутую цепь, то в нем индуктируется ток и проявления самоиндукции в первом проводнике задерживаются.

549. Такие результаты ясно показывают, что если указанные явления вызываются наличием количества движения, то это количество движения, конечно, присуще не электричеству в проводнике, так как один и тот же проводник, несущий строго определенный ток, обнаруживает различные свойства в зависимости от своей формы; даже если форма проводника сохраняется той же самой,

[1] Exp. Res., 1077".

присутствие посторонних тел, например куска железа или замкнутого металлического контура, изменяет результат".

В этом кратком параграфе 549 и сформулирована, собственно говоря, та новая точка зрения, которая отличает воззрения Фарадея — Максвелла от воззрений, господствовавших в физике до них. С одной стороны, явления самоиндукции позволяют констатировать, что „электрическому току" присуще некоторое количество движения. С другой стороны, принимается во внимание то существенное различие между течением электричества по проводнику и течением обычной жидкости в трубе, о котором свидетельствует ряд привходящих обстоятельств (влияние формы проводника, влияние окружающих проводник „внешних тел", как то железные массы и замкнутые иные цепи). Основываясь на всем этом, Максвелл делает чрезвычайно смелое, но оказавшееся столь плодотворным заключение, что *количество движения не должно быть ассоциируемо с протекающим внутри проводника электричеством.* Тем самым внимание переносится на окружающее проводник пространство, где всегда находится магнитный поток, органически связанный с „электрическим током", т. е. поток самоиндукции.

Следующий параграф характеризует принципиальную сторону воззрений Максвелла касательно связи физических процессов с движением материи, причем это движение понимается им, конечно, в смысле пространственного перемещения.

„550. Трудно, однако, нашему сознанию, установив один раз аналогию между явлениями самоиндукции и движением материальных тел, затем полностью отказаться от помощи со стороны такой аналогии или признать ее совершенно поверхностной или даже обманчивой. Основное динамическое понимание материи как чего-то способного благодаря своему движению становиться носителем количества движения и энергии, настолько переплетается с формами нашего мышления, что, если мы где-нибудь можем уловить в некоторых явлениях природы намек на эти свойства, мы чувствуем, что перед нами открывается путь, могущий раньше или позже привести нас к полному пониманию предмета".

Наконец, в параграфах 551 и 552 Максвелл подчеркивает, что энергия электрического тока или, лучше сказать, энергия того происходящего в пространстве явления, осью которого служит „проводник с током", есть энергия кинетическая.

„551. В случае электрического тока мы находим, что когда электродвижущая сила начинает действовать, она не создает сразу полного тока, но что ток возрастает постепенно. В чем заключается действие электродвижущей силы в течение того времени, когда противодействующее сопротивление не в состоянии ее уравновесить? Она в течение этого времени увеличивает силу тока.

Обычная сила, действуя на некоторое тело в направлении его движения, увеличивает его количество движения и сообщает ему кинетическую энергию или способность производить работу за счет его движения.

Аналогично этому, неуравновешенная сопротивлением часть электродвижущей силы идет на увеличение силы тока. Обладает ли электрический ток, подобным образом созданный, количеством движения или кинетической энергией?

Мы уже показали, что он обладает чем-то, весьма похожим на количество движения, что он оказывает противодействие при

попытке внезапно его прервать и что он может создать на короткое время значительную электродвижущую силу.

Вместе с тем, проводящий контур, в котором возбужден ток, обладает способностью производить работу именно благодаря наличию этого тока, и эта способность не может быть названа чем-то подобным энергии, так как она представляет собою действительную и подлинную энергию.

Так, если предоставить самому себе некоторый ток, он будет продолжать циркулировать, пока не прекратится действием сопротивления цепи. Однако, прежде чем ток прекратится, он разовьет некоторое количество тепла и это тепло, выраженное в единицах работы, равно энергии, которой первоначально обладал ток.

Далее, ток, предоставленный самому себе, может произвести также механическую работу, перемещая магниты, и индуктивное действие подобных движений, согласно закону Ленца, прекратит ток скорее, чем это сделало бы одно сопротивление. Этим путем часть энергии тока может быть преобразована, вместо тепла, в механическую работу.

552. Таким образом, оказывается что система, содержащая электрический ток, является вместилищем энергии некоторого рода, и поскольку мы можем мыслить электрический ток только в качестве явления кинетического характера,[1] его энергия должна быть кинетической энергией, т. е. энергией, которой обладает движущееся тело вследствие своего движения.

Мы уже показали, что электричество внутри проводника нельзя рассматривать в качестве того движущегося тела, которое является носителем этой энергии, так как энергия движущегося тела не зависит от чего-нибудь внешнего по отношению к нему, а между тем присутствие посторонних тел вблизи тока изменяет его энергию.

Мы приходим, таким образом, к вопросу, нет ли какого-либо движения, происходящего вне проводника, в пространстве, которое не занято электрическим током, но в котором обнаруживаются электромагнитные действия тока.

Я не буду сейчас входить в обсуждение причин, в силу которых это движение можно было бы отнести к одному месту скорее, чем к другому, или давать предпочтение одному роду движения перед другим.

Что я предполагаю теперь сделать, это — рассмотреть следствия, вытекающие из предположения, что явления электрического тока представляют собой явления некоторой движущейся системы, причем движения передаются от одной части системы к другой посредством сил, природу и законы которых мы еще даже не пытаемся определить, так как мы можем исключить эти силы из уравнений движения, пользуясь методом, данным Лагранжем для связанных систем.

В ближайших пяти главах настоящего трактата я намерен вывести основные положения теории электричества, исходя из такого рода динамической гипотезы вместо того, чтобы следовать пути, который привел Вебера и других исследователей ко многим замечательным открытиям и экспериментам, а также к концепциям, некоторые из которых красивы своею смелостью. Я избрал этот метод, так как хочу показать, что для рассмотрения явлений суще-

[1] Faraday, Exp. Res. (283).

ствуют иные пути, которые кажутся мне более удовлетворительными и которые в то же время более соответствуют методам, принятым в предыдущих частях этой книги, чем методы, основанные на гипотезе непосредственного действия на расстоянии".

К вопросу о кинетической природе электрического тока Максвелл зновь возвращается в главе VI, озаглавленной так: „Динамическая теория электромагнитизма". Из этой главы мы приведем параграфы 568, 569 и 570:

„568. Мы показали в параграфе 552, что когда электрический ток существует в проводящей цепи, он обладает способностью совершить некоторое количество механической работы, притом совершенно независимо от какой бы то ни было внешней электродвижущей силы, поддерживающей ток. Затем, способность совершать работу есть не что иное, как энергия, и все виды энергии имеют одну и ту же природу, хотя и могут отличаться по форме. Энергия некоторого электрического тока может быть отнесена или к той форме энергии, которая определяется действительным движением материи, или к той, которая определяется способностью материи приходить в движение под влиянием сил, действующих между телами, определенным образом расположенными одно относительно другого.

„Первый вид энергии, энергия движения, носит название кинетической и, если углубиться в понимание этого вида энергии, он представляется столь фундаментальным фактом природы, что нам трудно вообразить себе возможность сведения его к чему-либо иному. Второй вид энергии, зависящий от положения, называется потенциальной энергией и обусловливается действием того, что мы называем силами, т. е. того, что имеет стремление изменять относительное расположение. Что касается этих сил, то хотя мы и можем принять их существование как опытный факт, однако постоянно чувствуем, что всякое объяснение механизма, благодаря которому тела приводятся в движение, представляет собой реальный вклад в наши знания.

569. Электрический ток не может быть рассматриваем иначе, как явление кинетическое. Даже Фарадей, который всегда стремился освободить свою мысль от влияния представлений, невольно порождаемых выражениями „электрический ток" и „электрическая жидкость", говорит об электрическом токе как о „чем-то продвигающемся, а не о простом расположении".[1]

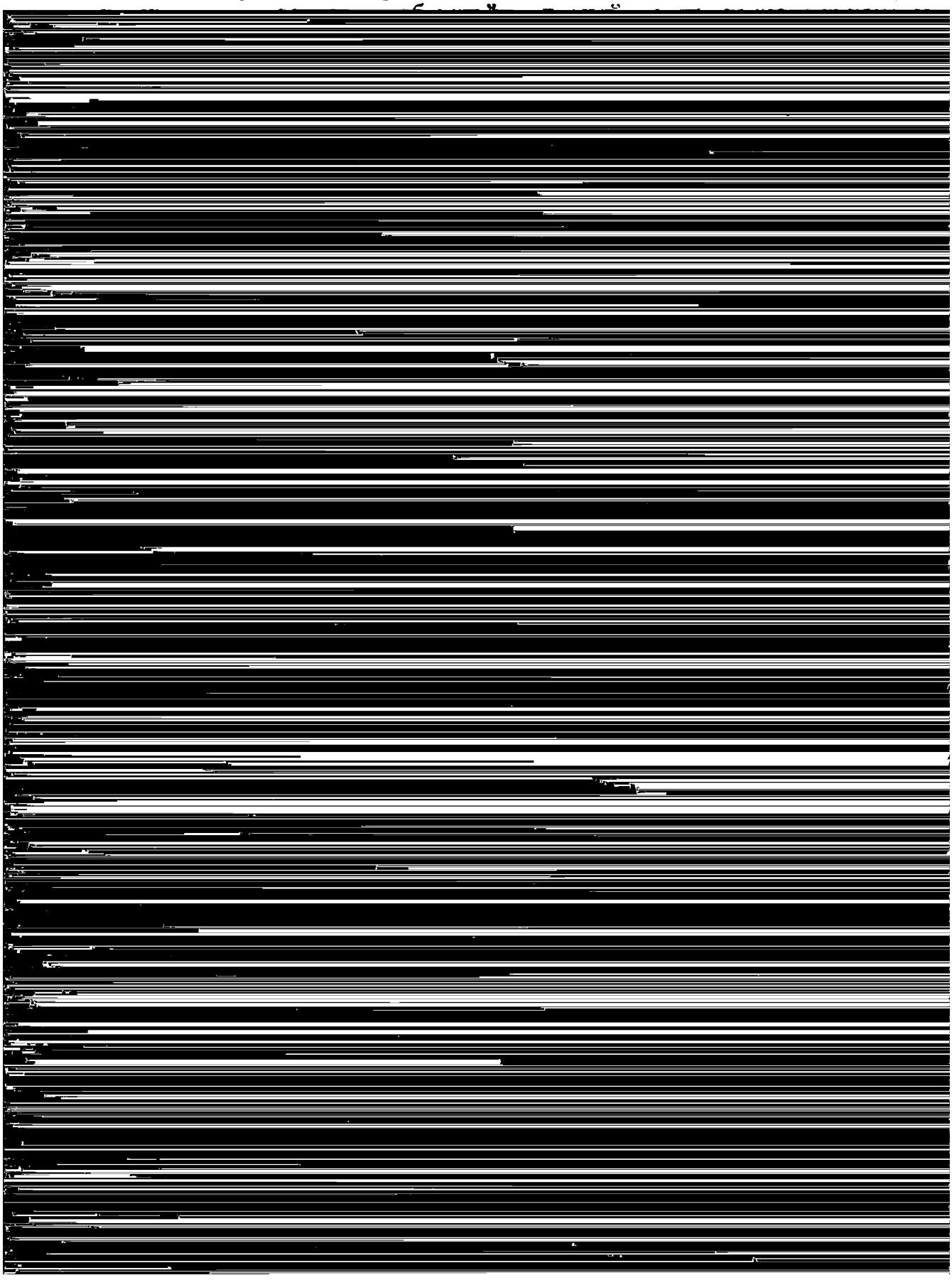
Такие действия тока, как электролиз и перенесение электричества с одного тела на другое, являются процессами, протекающими во времени, и имеют, таким образом, природу движения.

Что касается скорости тока, то мы показали, что мы о ней ничего не знаем: она может быть равна десятой доле дюйма в час или сотне тысяч миль в секунду.[2] Мы настолько далеки от знания ее величины в отдельных случаях, что мы даже не осведомлены, является ли направление, называемое нами положительным, действительным направлением движения или надо считать наоборот.

Всё допущение, которым мы здесь ограничиваемся, заключается лишь в том, что процесс электрического тока включает в себе движение некоторого рода. То, что вызывает возникновение электри-

„[1] Exp. Res., 283": (Something progressive and not a mere arrangement).
„[2] Exp. Res., 1648".

ческих токов, называется электродвижущей силой. Это название уже с давних пор было с успехом применяемо и никогда оно не привносило в научный язык каких-либо противоречий. Электродвижущую силу надо всегда понимать как нечто, действующее только на электричество, но не на несущие его тела. Никогда не следует смешивать ее с обычной механической силой, действующей только на тела, но не на электричество, находящееся в них. Если мы когда-нибудь узнаем формальное соотношение, которое существует



В этом случае полная кинетическая энергия системы сводится к одной только электрокинетической энергии T_e. Она представляет собой энергию системы токов самих по себе и зависит исключительно от сил токов, т. е. от электрических скоростей, но не от геометрических скоростей. Следующий параграф 49 специально посвящен общему рассмотрению проявлений электрокинетической энергии.

Наконец, третья составляющая кинетической энергии системы токов, обозначенная через T_{me}, названа Максвеллом *пондеро-электрокинетической энергией*, так как она может иметь конечное значение только при одновременном изменении и геометрических и электрических координат, иными словами, только при наличии как электрических токов, так и пространственных перемещений проводников. Самая возможность существования пондеро-электрокинетической энергии T_{me} была впервые констатирована Максвеллом в процессе развития того метода исследования, о котором мы сейчас говорим. В то время как проявления энергии T_m и энергии T_e по существу хорошо известны и в достаточной степени изучены в соответствующих областях науки, в отношении энергии T_{me} нельзя сказать того же. Проявления пондеро-электрокинетической энергии T_{me} до сих пор сравнительно мало изучены. Сам Максвелл пытался в ряде экспериментов подтвердить существование энергии T_{me}.[1] Вследствие недостаточной чувствительности примененных им методов результат получился отрицательный. Как показывают некоторые позднейшие весьма тщательные исследования, имевшие непосредственное отношение к данному вопросу, величина энергии T_{me} во всяком случае сравнительно настолько незначительна, что в обычных условиях практически мы не замечаем ее проявлений.

в. Все три составляющие кинетической энергии системы токов (T_m, T_e и T_{me}) являются однородными функциями второй степени от обобщенных скоростей. При этом коэффициенты A, B и C играют роль некоторых коэффициентов инерции, в состав которых могут входить только обобщенные координаты, но не обобщенные скорости.

Говоря о пондеро-кинетической энергии T_m, мы имели случай отметить, что коэффициенты A совершенно не зависят от электрических координат, т. е. от количеств электричества q_1, q_2, q_3 и т. д. При ближайшем рассмотрении оказывается, что количества электричества не входят также и в состав коэффициентов B и C.

Остановимся сначала на вопросе о коэффициентах B.

Предположим, что

$$i_1 = q_1' = \text{Const.},\quad i_2 = q_2' = \text{Const.}\ \text{и т. д.}$$

и

$$g_1' = 0,\quad g_2' = 0\ \text{и т. д.}$$

Тогда, как было уже указано, кинетическая энергия системы выражается одной составляющей T_e и, следовательно, будет содержать только члены с коэффициентами B, а именно:

$$T = T_e = \frac{1}{2} B_1 i_1^2 + \frac{1}{2} B_2 i_2^2 + \ldots + B_{12} i_1 i_2 + B_{13} i_1 i_3 + \ldots$$

Опыт показывает, что в этом случае кинетическая энергия системы, т. е. энергия системы токов, остается неизменною в течение сколь угодно большого промежутка времени, когда электрические коорди-

[1] Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, §§ 574 и 575.

наты q_1, q_2, q_3 и т. д. непрерывно и беспредельно возрастают. Таким образом, эти количества электричества не входят в коэффициенты B_1, B_2, ..., B_{12}, B_{13} и т. д., которые зависят только от геометрических координат g_1, g_2, g_3 и т. д.

Что касается коэффициентов C, то надо полагать, что и они не зависят от электрических координат q. Действительно, если допустить, что все токи в системе постоянны и вместе с тем все электрические цепи непрерывно совершают такого рода движения, при которых геометрические координаты изменяются лишь в некоторых узких пределах, периодически повторяясь, то полная кинетическая энергия системы, как свидетельствует опыт, претерпевает лишь периодические же изменения, никогда не выходя за известные пределы. В то же время электрические координаты q (количества протекшего электричества) непрерывно и беспредельно растут. Если бы они входили в коэффициенты C, то можно было бы ожидать непрерывного изменения суммарной кинетической энергии в каком-либо определенном направлении, но этого не наблюдается. Следовательно, и коэффициенты C можно считать зависящими только от геометрических координат.

Справедливость принятого Максвеллом положения о независимости коэффициентов B и C от электрических координат q подтверждается и следующими соображениями. Дело в том, что некоторое количество какого-либо обычного вещества, например кусок железа, по существу есть совокупность очень большого числа элементарных токов. К такой системе должно быть в полной мере применимо всё, что сказано об электрокинетической энергии T_e и о пондеро-электрокинетической энергии T_{me}. В отношении энергии T_{me} необходимо еще принять во внимание, что элементарные частицы вещества находятся в непрерывном тепловом движении, т. е. в подобной системе g_1', g_2', g_3' и т. д., вообще говоря, не равны нулю. Если бы коэффициенты B и C зависели от непрерывно возрастающих координат q, то полное количество энергии, ассоциируемое с данным куском железа, должно было бы беспредельно изменяться в каком-либо определенном направлении. Однако всё известное в настоящее время о природе и о строении вещества позволяет утверждать, что такого рода изменений указанной энергии, которые можно было бы пытаться объяснять непрерывным возрастанием электрических координат q, в действительности не наблюдается.

Итак, кинетическая энергия некоторой системы электрических токов, обусловленная именно наличием этих токов, ни в коей степени не зависит от количеств электричества, которые протекли по электрическим цепям, входящим в состав данной системы.

Какие бы то ни было количества электричества совсем исключены из выражений, полученных Максвеллом для электрокинетической энергии T_e и пондеро-электрокинетической энергии T_{me}. В эти выражения входят лишь токи в качестве характеристик интенсивности электромагнитного процесса, совершающегося в системе. Мы можем даже, говоря об энергии T_e или об энергии T_{me}, совершенно отвлечься от обычного определения силы тока как производной по времени от некоторого количества электричества. Мы можем руководствоваться только чисто электромагнитным определением силы тока, вытекающим из закона магнитодвижущей силы (см. § 14 Главы II) и не связанным с представлением о течении электричества вдоль проводника. Всё это находится в полном соответствии с общими установками Максвелла, согласно которым *электричество в проводнике во всяком случае не является носителем кинетической энергии, присущей току.*

§ 49. Электрокинетическая энергия

а. После краткого ознакомления со структурою кинетической энергии системы проводящих цепей с токами (§ 48) остановим наше внимание на той составляющей этой энергии, рассмотрение которой дает особенно много материала для суждения о вероятной природе электрического тока. Мы имеем в виду электрокинетическую энергию T_e.

Как было уже выяснено, электрокинетическая энергия есть однородная функция второй степени от сил токов:

$$T_e = \frac{1}{2} B_1 i_1^2 + \frac{1}{2} B_2 i_2^2 + \ldots + B_{12} i_1 i_2 + B_{13} i_1 i_3 + \ldots$$

Входящие в это выражение коэффициенты при квадратах и произведениях сил токов, представленные в данном случае буквами B с различными значками, мы будем в дальнейшем обозначать при помощи общепринятых символов. Дело в том, что изучение проявлений электрокинетической энергии обнаруживает следующее. Коэффициенты B при квадратах сил токов оказываются не чем иным, как коэффициентами самоиндукции (или индуктивностями электрических цепей), обычно обозначаемыми буквами L. Коэффициенты же B при произведениях двух различных сил токов являются коэффициентами взаимной индукции (или взаимными индуктивностями цепей). Для их обозначения принята буква M. В связи со сказанным выражение для электрокинетической энергии можно представить так:

$$T_e = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \ldots + M_{12} i_1 i_2 + M_{13} i_1 i_3 + \ldots$$

При этом символы L снабжаются одним значком, отмечающим, к какой цепи относится тот или иной коэффициент самоиндукции, а символы M снабжаются двумя значками соответственно двум цепям, индуктивное взаимодействие которых имеется в виду.

Согласно тому, что было сказано в предыдущем § 48, коэффициенты L и M следует считать зависящими только от геометрических координат, т. е. от размеров и формы отдельных контуров с токами, а также от их взаимного расположения (коэффициенты M). Это утверждение находится в кажущемся противоречии с тем обстоятельством, что практически, при расчете коэффициентов L и M, мы принимаем еще во внимание магнитную проницаемость окружающей проводники среды. Но дело в том, что очень часто мы оперируем не с *истинными* коэффициентами L и M, а с их *действующими* значениями, которые применяются ради упрощения описания электромагнитных явлений, происходящих в системе токов. Истинные коэффициенты L и M зависят безусловно *только от геометрических координат*. При этом предполагается, что все контуры токов находятся в „пустоте“ (в эфире). И если, например, проводники окружают своими нитками какой-либо железный сердечник, то рассматриваемая система электрических цепей по существу должна быть дополнена большим количеством внутриатомных токов, которые существуют в объеме железа. Конечно, в таком случае мы будем иметь дело именно с истинными коэффициентами L и M. Однако подобного рода учет присутствия железа или иного обычного вещества в поле основных токов системы весьма осложнил бы практические расчеты. Поэтому обычно, в случае приближенного описания

явлений, игнорируют указанные внутриатомные токи и ограничиваются тем, что принимают во внимание некоторый интегральный эффект процессов, происходящих в среде, окружающей основные проводники системы. Это делается путем введения магнитной проницаемости среды в выражения, определяющие величины коэффициентов L и M. Таким образом и получаются действующие значения L и M. Следует еще особо подчеркнуть одно существенное различие между истинными и действующими значениями коэффициентов L и M. В случае неподвижности всех основных электрических цепей системы, т. е. при неизменности их геометрических координат, истинные коэффициенты L и M являются в полном смысле слова *константами*, характеризующими данные цепи. Эти константы совершенно не зависят от сил токов. При тех же условиях действующие коэффициенты L и M, вообще говоря, являются функциями сил токов, так как магнитная проницаемость обычного вещества, находящегося в поле токов, может зависеть от степени магнитного воздействия со стороны этих токов. Подобная зависимость особенно сильно сказывается, как известно, в случае ферромагнитных материалов. Вследствие этого при разного рода практических расчетах приходится считаться с различными способами определения действующих коэффициентов L и M (различают эти коэффициенты — динамические или дифференциальные, средние и т. п.). Иногда действующими значениями коэффициентов L и M учитывается также и влияние токов в сплошных металлических массах или в короткозамкнутых цепях, расположенных вблизи основных проводников системы и по каким-либо соображениям не включаемых явно в состав рассматриваемой системы. В дальнейшем изложении в наших рассуждениях мы обычно всегда будем иметь в виду истинные значения коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции.

6. Представим электрокинетическую энергию системы токов в следующем виде:

$$T_e = \frac{1}{2}(L_1 i_1) i_1 + \frac{1}{2}(L_2 i_2) i_2 + \ldots + \frac{1}{2}(M_{12} i_2) i_1 + \frac{1}{2}(M_{12} i_1) i_2 + \ldots$$

Стоящие в скобках произведения коэффициентов L и M на соответствующие токи выражают собой магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции, существующие в рассматриваемой системе. Поэтому можем написать:

$$T_e = \frac{1}{2}\Phi_{s1} i_1 + \frac{1}{2}\Phi_{s2} i_2 + \ldots + \frac{1}{2}\Phi_{м21} i_1 + \frac{1}{2}\Phi_{м12} i_2 + \ldots$$

Здесь через Φ_s обозначены потоки самоиндукции и добавочной цифрой отмечено, с какою цепью связан данной поток. Через $\Phi_м$ обозначены потоки взаимной индукции, а добавочные цифры показывают, током какой цепи создается данный поток взаимной индукции (первая цифра) и какую другую цепь этот поток пронизывает (вторая цифра).

Благодаря указанным преобразованиям электрокинетическая энергия T_e приведена к форме, не содержащей в явном виде коэффициентов L и M, которые сами по себе ничего еще не говорят об электромагнитном процессе, так как являются функциями лишь чисто геометрических координат. Теперь в выражение для T_e входят только магнитные потоки и токи, которые в совокупности наиболее полно отражают собой самое существенное, что происходит в данной системе.

В § 21 Главы III было разъяснено, что величина $\frac{1}{2}i$ представляет собой меру энергии каждой магнитной линии, сцепляющейся с током i или, точнее сказать, меру магнитной энергии, привносимой в полную энергию потока каждым отдельным сцеплением магнитной линии с каким-либо током. На основании этого члены, входящие в состав выражения электрокинетической энергии, необходимо рассматривать в качестве слагаемых, сумма которых равна энергии всех магнитных линий, связанных с данной системой токов, т. е. энергии всех магнитных полей данной системы. Следовательно, можем написать:

$$T_e = \frac{1}{2}\Phi_{s1}i_1 + \frac{1}{2}\Phi_{s2}i_2 + \ldots + \frac{1}{2}\Phi_{м21}i_1 + \frac{1}{2}\Phi_{м12}i_2 + \ldots = \frac{1}{2}\int_t BHdv,$$

где интегрирование распространено по всему объему, занятому магнитным полем системы токов.

Итак, *вся электрокинетическая энергия некоторой системы токов есть не что иное, как энергия тех магнитных потоков, которые существуют в данной системе и вообще являются носителями всех свойств магнитного поля системы.*

в. Переходя теперь к рассмотрению внешних сил, действующих в системе токов (мы имеем, конечно, в виду обобщенные силы) и могущих сообщать приращение электрокинетической энергии T_e, коснемся сначала вопроса об электродвижущих силах. Допустим, что некоторая внешняя электродвижущая сила e_k' приложена к цепи, порядковый номер которой есть k. Часть этой электродвижущей силы $(r_k i_k)$ расходуется на преодоление сопротивления цепи r_k. Другая часть, а именно $e_k' - r_k i_k$, идет на преодоление электромагнитной инерции цепи и на изменение электрокинетической энергии рассматриваемой системы токов. Эта часть внешней электродвижущей силы как-раз и определяется соответствующим уравнением Лагранжа:

$$e_k' - r_k i_k = \frac{d}{dt}\frac{\partial T_e}{\partial q_k'} - \frac{\partial T_e}{\partial q_k}.$$

Так как T_e совершенно не зависит от электрических координат q, т. е. от количеств электричества, то

$$\frac{\partial T_e}{\partial q_k} = 0.$$

Вводя, кроме того, уже принятое обозначение

$$q_k' = \frac{dq_k}{dt} = i_k,$$

получаем окончательно

$$e_k' - r_k i_k = \frac{d}{dt}\frac{\partial T_e}{\partial i_k}.$$

Мы видим, что при определении электродвижущих сил имеет особое значение частная производная электрокинетической энергии по соответствующему току. На основании тех общих соображений, с которыми мы познакомились в § 47, Максвелл назвал эту частную производную *электрокинетическим моментом* (electrokinetic momentum), т. е. коли-

чеством движения в электрокинетическом процессе. Обозначая электрокинетический момент (по Максвеллу) через p, можем написать

$$p_k = \frac{\partial T_e}{\partial i_k} = L_k i_k + M_{1k} i_1 + M_{2k} i_2 + M_{3k} i_3 + \ldots$$

Величина p действительно имеет характер некоторого количества движения или, вернее, момента количества движения. Совершенно аналогичным образом, в случае поступательного или вращательного движения обычного материального тела производная его кинетической энергии по скорости (линейной или угловой) представляет собою именно количество движения или момент количества движения. Величина же p есть производная электрокинетической энергии T_e по электрической скорости (i).

Вводя в выражение для p, вместо произведений коэффициентов L и M на силы токов, соответствующие магнитные потоки, получаем

$$p_k = \Phi_{sk} + \Phi_{m1k} + \Phi_{m2k} + \ldots = \Phi_k,$$

где Φ_k есть полный магнитный поток, сцепляющийся с контуром тока i_k. Подобно этому можем написать:

$$p_1 = \Phi_{s1} + \Phi_{m21} + \Phi_{m31} + \ldots = \Phi_1,$$

$$p_2 = \Phi_{s2} + \Phi_{m12} + \Phi_{m32} + \ldots = \Phi_2,$$

$$p_3 = \Phi_{s3} + \Phi_{m13} + \Phi_{m23} + \ldots = \Phi_3,$$

и т. д.

Следовательно, *полный магнитный поток, пронизывающий некоторую электрическую цепь, есть мера того специфического момента количества движения, который присущ этой цепи в связи с электрокинетическим процессом.*

Обозначая через p_0 момент количества движения, отнесенный к единичной трубке магнитной индукции, т. е. к одной магнитной линии, имеем:

$$p_0 = 1.$$

Величина p_0 есть константа, характеризующая каждую магнитную линию, в каких бы условиях мы ни рассматривали данную магнитную линию и с какими бы токами она ни была сопряжена.

Достойно особого внимания следующее обстоятельство:

Момент количества движения, которым обладает каждая магнитная линия, т. е. каждая единичная трубка магнитной индукции, по своей кинетической природе абсолютно не зависит от размеров контура этой магнитной линии.

Контур магнитной линии может иметь размеры земной орбиты. Он может быть микрофизического масштаба. Размеры контура магнитной линии могут быть даже ультрамикрофизического масштаба. Всегда и неизменно должно быть:

$$p_0 = \text{Const.},$$

т. е. момент количества движения, носителем которого является одна магнитная линия, всегда сохраняет свою величину.

Здесь мы встречаемся с проявлениями *закона сохранения момента количества движения*. Закон этот соблюдается во всякой так называемой

консервативной системе, т. е. в системе, в которой движения совершаются при отсутствии внутренних трений и каких бы то ни было иных причин рассеяния энергии за пределы данной системы. В свойствах магнитного потока мы встречаемся с одним из случаев, подтверждающих общее положение, гласящее, что движение как таковое по существу никогда не может быть уничтожено и вечно сохраняется, претерпевая лишь те или иные преобразования.

В связи со сказанным возникает один чрезвычайно важный вопрос, имеющий принципиальное значение: *может ли элементарная трубка магнитной индукции, т. е. реальная магнитная линия, как-либо прекратить свое существование?*

В высокой степени правдоподобно предположение, что всякая элементарная трубка магнитной индукции является некоторой формой движения эфира. Обоснованию этой точки зрения мы посвятили всю Главу I настоящей книги. Если принять во внимание, что эфир можно мыслить только как среду, полностью лишенную вязкости (внутреннего трения), то весьма трудно и даже совершенно невозможно представить себе, чтобы реальная магнитная линия, сокращаясь до каких угодно предельно малых размеров и при этом всё время сохраняя неизменно присущий ей момент количества движения

$$p_0 = \text{Const.},$$

внезапно теряла этот момент количества движения и переставала существовать.

Мы приходим, таким образом, к весьма важному выводу, что *реальная магнитная линия* (*элементарная трубка магнитной индукции*) *абсолютно не уничтожаема.*

В этом отношении естественно сделать сопоставление с выводом Гельмгольца об абсолютной неуничтожаемости замкнутых вихревых нитей в безграничной „идеальной" жидкости, т. е. в жидкости без внутреннего трения. Мы получаем при этом одно из самых веских оснований для того, чтобы считать магнитные линии именно вихревыми нитями в безграничной среде, именуемой эфиром (см. § 5 Главы I).

Когда во время преобразований магнитного потока замкнутый контур одной магнитной линии делится на два или несколько обособленных контуров, а также когда две обособленные магнитные линии сращиваются в один контур, всё происходит без какого бы то ни было нарушения той закономерности, согласно которой каждая отдельная магнитная линия обладает неизменным моментом количества движения p_0. Здесь не бывает возникновения из ничего новых моментов количества движения p_0, которые необходимо приписать образующимся самостоятельным магнитным звеньям. Не исчезает бесследно момент количества движения p_0, которым обладала одна из двух сливающихся магнитных линий. Дело в том, что структурные преобразования магнитного потока всегда происходят одновременно с теми или иными энергетическими процессами (см. §§ 32—34 Главы IV) и при этом, конечно, должны иметь место преобразования форм движения, которое органически присуще магнитному потоку.

В связи с рассмотренным свойством магнитных линий ($p_0 = \text{Const.}$) в качестве следствия, необходимо вытекающего из общих фарадее-максвелловских установок и из основ электродинамики Максвелла, можно высказать *положение о квантовании того момента количества движения, носителем которого является магнитный поток.*

Как увидим далее (§ 59), всё сказанное по поводу неуничтожаемости реальных магнитных линий имеет самое непосредственное отношение к вопросу о природе электрического тока.

г. Внешние силы, воздействующие на некоторую систему токов и стремящиеся изменить ее электрокинетическую энергию T_e, должны встречать противодействие со стороны сил реакции, являющихся следствием электромагнитных процессов, протекающих в системе. Так как силы реакции вообще в точности равны по абсолютной величине и обратны по знаку внешним силам, приложенным к данной системе, то ясно, что значения указанных сил реакции просто получаются на основании лагранжевых уравнений. Рассмотрение внешних сил мы можем, таким образом, заменить обследованием противоположных им внутренних сил, которые проявляются в системе токов. Эти внутренние силы представляют интерес в том отношении, что они непосредственно характеризуют свойства всякой электродинамической системы.

Как указано было выше, та составляющая внешней электродвижущей силы, которая сообщает приращение электрокинетической энергии T_e путем воздействия на ток i_k, выражается разностью $e_k' - r_k i_k$. Обозначая через e_k возникающую в цепи этого тока внутреннюю электродвижущую силу реакции, можем написать

$$e_k' - r_k i_k = - e_k.$$

Следовательно,

$$e_k = - \frac{d}{dt} \frac{\partial T_e}{\partial i_k},$$

или

$$e_k = - \frac{dp_k}{dt}.$$

Подставляем вместо p_k соответствующий магнитный поток и приходим к такому выражению:

$$e_k = - \frac{d\Phi_k}{dt}.$$

Это есть электродвижущая сила индукции, открытая Фарадеем.

Импульс электродвижущей силы e_k за некоторый промежуток времени будет выражаться так:

$$\int_0^t e_k \, dt = - \int_0^t \frac{d\Phi_k}{dt} = - \Delta\Phi_k.$$

Таким образом, импульс индуктированной электродвижущей силы по абсолютной величине равен приращению момента количества движения, носителем которого является магнитный поток, сцепившийся с рассматриваемым контуром тока.

Это соотношение, совершенно аналогичное соответствующей закономерности из области теоретической механики, представляет значительный интерес по своему внутреннему содержанию и дополняет всё сказанное выше о глубоком физическом смысле основ электродинамики Максвелла.

Остановимся теперь на составляющих электродвижущей силы e_k. Так как полный магнитный поток, сцепляющийся с контуром тока i_k, слагается из потока самоиндукции и потоков взаимной индукции, т. е.

$$\Phi_k = \Phi_{sk} + \Phi_{m1k} + \Phi_{m2k} + \dots,$$

то получаем

$$e_k = -\frac{d\Phi_{sk}}{dt} - \frac{d(\Phi_{м1k} + \Phi_{м2k} + \ldots)}{dt} = e_{sk} + e_{мk},$$

где

$$e_{sk} = -\frac{d\Phi_{sk}}{dt},$$

есть электродвижущая сила самоиндукции, возникающая в k-том контуре в связи с изменениями потока самоиндукции Φ_{sk}, который представляет собой, как мы уже указывали, основное проявление самого существования тока i_k. В то же время

$$e_{мk} = -\frac{d(\Phi_{м1k} + \Phi_{м2k} + \ldots)}{dt} = -\frac{d\Phi_{мk}}{dt}$$

есть электродвижущая сила взаимной индукции, возникающая в k-том контуре в связи с изменениями магнитного потока, который может быть назван внешним по отношению к цепи тока i_k. Этот внешний магнитный поток $\Phi_{мk}$ слагается из отдельных потоков взаимной индукции, сцепляющихся с контуром тока i_k и создаваемых посторонними токами i_1, i_2, i_3 и т. д. Следовательно, наличие указанного внешнего магнитного потока $\Phi_{мk}$ обуславливает собой возможность индуктивных воздействий на цепь тока i_k со стороны других частей рассматриваемой системы токов.

Можно, конечно, представить e_{sk} и $e_{мk}$ и в форме, содержащей коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции в явном виде:

$$e_{sk} = -\frac{d(L_k i_k)}{dt},$$

$$e_{мk} = -\frac{d(M_{1k} i_1 + M_{2k} i_2 + \ldots)}{dt}.$$

В частном случае системы, состоящей из двух неподвижных и неизменяемых цепей, получаем обычные выражения:

$$e_{s1} = -L_1 \frac{di_1}{dt},$$

$$e_{м1} = -M\frac{di_2}{dt}$$

и

$$e_{s2} = -L_2 \frac{di_2}{dt},$$

$$e_{м2} = -M\frac{di_1}{dt}.$$

Мы видим, таким образом, что все случаи электромагнитной индукции охватываются общими соотношениями, вытекающими из применения уравнений Лагранжа к электродинамической системе, состоящей из произвольного числа электрических цепей. Здесь мы встречаемся не с чем-либо по существу новым, а с теми именно проявлениями свойств магнитного потока, которые были уже рассмотрены в §§ 16—20 Главы III.

д. Предположим теперь, что к некоторой системе проводников с токами приложена внешняя сила механического характера, которая воздействует на геометрическую координату g_k, определяющую размеры или расположение k-той цепи, и может путем изменения этой координаты сообщать приращение электрокинетической энергии T_e. Обозначим через f_k' остаток, получаемый за вычетом из указанной внешней силы той ее части, которая идет на преодоление всякого рода механических трений в системе проводников. Пользуясь уравнениями Лагранжа, можем написать:

$$f_k' = \frac{d}{dt}\frac{\partial T_e}{\partial g_k'} - \frac{\partial T_e}{\partial g_k}.$$

Так как величина электрокинетической энергии T_e не зависит от геометрических скоростей g', то имеем

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_e}{\partial g_k'} = 0,$$

и выражение для силы f'_k принимает вид

$$f_k' = -\frac{\partial T_e}{\partial g_k}.$$

Внешняя сила f'_k встречает реакцию со стороны так называемой *электромагнитной силы*, имеющей, конечно, также механический характер и возникающей в системе проводников с токами в связи с электромагнитными процессами, которые происходят в этой системе. Обозначая указанную электромагнитную силу через f_k, можем написать

$$f_k' = -f_k.$$

На основании этого имеем

$$f_k = \frac{\partial T_e}{\partial g_k}.$$

Силы этого рода были изучены и теоретически обследованы Ампером.

Перепишем последнее соотношение, явно введя в него коэффициенты L и M. Принимая при этом во внимание, что от геометрической координаты g_k в рассматриваемом случае зависят лишь величины L_k, M_{1k}, M_{2k}, M_{3k} и т. д., получаем

$$f_k = \frac{1}{2}\frac{\partial L_k}{\partial g_k} i_k^2 + \frac{\partial M_{1k}}{\partial g_k} i_1 i_k + \frac{\partial M_{2k}}{\partial g_k} i_2 i_k + \frac{\partial M_{3k}}{\partial g_k} i_3 i_k + \ldots$$

Электрические токи по существу не зависят от геометрических координат и при рассмотрении электромагнитной силы, проявляющейся в каждый данный момент времени, должны трактоваться как величины постоянные. Поэтому под знак частной производной по геометрической координате можем вводить любые токи. В таком случае имеем

$$f_k = \frac{1}{2}\frac{\partial (L_k i_k)}{\partial g_k} i_k + \frac{\partial (M_{1k} i_1)}{\partial g_k} i_k + \frac{\partial (M_{2k} i_2)}{\partial g_k} i_k + \frac{\partial (M_{3k} i_3)}{\partial g_k} i_k + \ldots$$

или

$$f_k = \frac{1}{2}\frac{\partial \Phi_{sk}}{\partial g_k} i_k + \frac{\partial \Phi_{mk}}{\partial g_k} i_k = \frac{\partial \left(\frac{1}{2}\Phi_{sk} + \Phi_{mk}\right)}{\partial g_k} i_k.$$

Таким образом, при данных неизменных токах, величина электромагнитной силы f_k, возникающей в некоторой системе и приложенной к проводнику с током i_k, определяется только характером зависимости от геометрической координаты g_k тех магнитных потоков (потока самоиндукции и потока взаимной индукции), которые сцепляются с контуром тока i_k.

Из приведенного выше общего выражения электромагнитной силы путем несложных преобразований можно, как известно, получить частные соотношения как для сил механического взаимодействия проводника с током и внешнего магнитного потока, так и для сил, приложенных к проводнику в связи с наличием потока самоиндукции. Все эти силы представляют собой нормальные проявления механических свойств магнитного потока, которых мы уже касались в § 23 Главы III и в ряде других мест.[1]

е. Подведем теперь итоги всему тому, что было сказано о кинетическом характере физического процесса, называемого „электрическим током".

Необычайное обилие глубоких мыслей и суждений, которые Максвелл развил в своей электродинамике, а также полученные им при этом результаты уже дают полную возможность сделать ряд заключений, имеющих отношение к вопросу о природе электрического тока. Нижеследующие положения необходимо считать вытекающими из общих и частных максвелловских установок:

1. В пространстве вокруг проводника, где находится магнитный поток самоиндукции, происходит специфическое движение материи, которое представляет собой наиболее существенную и совершенно неотъемлемую часть электромагнитного комплекса, обычно описываемого при помощи термина „электрический ток".

2. Носителем момента количества движения в процессе электрического тока является не электричество в проводнике, но магнитный поток в пространстве, окружающем проводник.

3. Носителем электрокинетической энергии тока является не электричество в проводнике, но магнитный поток в пространстве, окружающем проводник.

4. Электрокинетическая энергия, присущая некоторому электрическому току, в точности равна энергии магнитного поля тока и распределена по всему пространству, занятому этим магнитным полем, т. е. там, где находится поток самоиндукции. Электричество в проводнике решительно ничего не привносит в величину электрокинетической энергии.

5. Так как идея о „физическом действии на расстоянии" несомненно ошибочна и не может служить базой для объяснения природы каких бы то ни было физических процессов, то индуктируемые электродвижущие силы следует рассматривать в качестве проявления свойств магнитного

---

[1] Из основного выражения

$$f_k = \frac{\partial T_e}{\partial g_k}$$

непосредственно вытекает обычное соотношение, определяющее величину электромагнитной силы, приложенной к прямолинейному проводнику, по которому протекает ток i. Указанное соотношение имеет следующую форму: $f = Bli \sin\theta$, где B есть магнитная индукция во внешнем поле, l — длина рассматриваемого участка проводника и θ — угол между направлением вектора магнитной индукции B и осью проводника. В случае $\theta = 90°$ это соотношение приводится к простейшему виду:

$$f = Bli.$$

потока, а ни в коем случае не как проявление свойств электричества в проводниках.

6. По той же причине электромагнитные силы следует рассматривать как проявление свойств магнитного потока, а не электричества в проводниках.

7. Каждая элементарная составляющая магнитного потока, т. е. каждая реальная магнитная линия, является носителем некоторого строго определенного момента количества движения, который совершенно не зависит от размеров контура магнитной линии. Этот момент количества движения есть константа, характеризующая магнитную линию как физическую реальность.

8. В высокой степени правдоподобно предположение, что реальная магнитная линия (элементарная трубка магнитной индукции) абсолютно неуничтожаема. Она может претерпевать всякого рода структурные преобразования, сращиваясь с другими магнитными линиями или разделяясь на ряд самостоятельных контуров обособленных магнитных линий. Контур магнитной линии может сокращаться до некоторых предельно малых размеров, и это совместимо с сохранением индивидуальных признаков магнитной линии.

В следующих параграфах мы познакомимся еще с добавочными соображениями в пользу точки зрения, очерченной в пунктах 1—8, а также отчасти выясним роль движения электричества в проводнике.

§ 50. Сверхпроводники. Общие соображения

а. В области теоретической механики мы начинаем с изучения движений материального тела в „пустоте“, т. е. при полном отсутствии какой-либо среды, могущей оказывать сопротивление движению тела. В таком случае свойства материальной инерции выступают особенно рельефно, и мы можем изучать в самом чистом виде различные основные проявления кинетической энергии движущегося тела. Это есть простейший случай движения материальной системы. Постоянная скорость движения может иметь место только тогда, когда нет никакой приложенной к телу внешней механической силы (движущей силы). В достаточной степени изучив всё, что происходит при отсутствии сопротивления среды, мы затем, с полным осознанием существенных сторон этого процесса, переходим к рассмотрению движения материального тела в какой-либо вязкой среде, наличие которой сильно изменяет общие условия обследуемого движения. Мы знаем, в частности, что в этом случае для получения постоянной скорости движения необходимо приложить к телу непрерывно действующую постоянную движущую силу.

Если бы мы начинали изучать движение материального тела, исходя из случая достаточно вязкой среды, в которой помещено рассматриваемое тело, то основные законы динамики материальной системы были бы в высокой степени замаскированы привходящими обстоятельствами, связанными с сопротивлением среды. Потребовались бы значительные усилия для того, чтобы заставить себя отвлечься от различных сопровождающих вторичных явлений и выдвинуть на первый план принципиальные свойства движущейся системы. В действительности, однако, наблюдение многих явлений природы и надлежащим образом поставленный эксперимент позволяют нам без всяких затруднений исследовать процесс движения материального тела при отсутствии или, точнее сказать, при почти полном отсутствии сопротивляющейся среды. Мы при-

выкли совершенно отчетливо разбираться в основных законах динамики, исходя из простейших случаев. Но если бы человечество существовало в некоторой очень вязкой среде, от которой ему было бы трудно освободиться и за пределами которой оно не умело бы легко и просто наблюдать что-либо, то весьма вероятно, что, изучая движение тела в обычной обстановке, мы привыкли бы смотреть на добавочные движения сопротивляющейся среды и на обусловленный наличием этой среды постоянный расход энергии — как на существенную и принципиально неотъемлемую сторону изучаемого явления.

Нечто в высокой степени аналогичное мы можем констатировать в отношении наших традиционных представлений об „электрическом токе", который долгое время был известен только как процесс, протекающий в некоторой проводящей цепи, обладающей сопротивлением, не равным нулю. Мы очень склонны рассматривать в качестве чего-то, имеющего весьма существенное и даже принципиальное значение в вопросе о природе тока, то движение элементарных носителей электричества (электронов, ионов и т. п.), которое несомненно происходит в *объеме* обыкновенного проводника и связано с выделением *джоулева тепла*. Нам чрезвычайно трудно отказаться от подобной точки зрения, и это кажется совершенно невозможным. Всё это происходит вследствие того, что мы долгое время не были знакомы с проводниками, лишенными способности преобразовывать энергию электромагнитного процесса в тепло, т. е. в энергию беспорядочного движения элементов вещества в объеме проводника. Мы привыкли рассуждать исключительно лишь о таком токе, который нагревает проводники цепи, и создали терминологию применительно к подобному случаю. Благодаря этому нам очень трудно отрешиться от старых привычных взглядов, когда мы пытаемся понять основные процессы, совершающиеся в простейшем случе электрического тока, т. е. в случае тока, протекающего вдоль *сверхпроводника*.

В настоящее время проводник, у которого $r = 0$, не есть что-либо воображаемое, нереальное. Как известно, в 1911—1914 гг. работы Камерлинг-Оннеса привели к открытию сверхпроводимости. Оказывается, что некоторые металлы (например, свинец, олово, ртуть и ряд других), будучи сильно охлаждены до температуры, близкой к абсолютному нулю, внезапно делаются сверхпроводящими: их электрическое сопротивление становится равным нулю или практически равным нулю. В цепи, состоящей из сверхпроводников, Камерлинг-Оннесу удалось при помощи процесса электромагнитной индукции возбудить ток, который затем при полном отсутствии какой бы то ни было электродвижущей силы сохранялся, практически не ослабевая в течение ряда часов. Электрокинетическая энергия этого тока не расходовалась на образование джоулева тепла, т. е. имело место соотношение

$$ri^2 = 0.$$

Таким образом, теперь уже есть возможность изучать электрический ток в условиях, не осложняемых тепловыми явлениями. Это несомненно есть наиболее простой случай электрокинетического процесса, называемого „электрическим током". Ясно, конечно, что основные свойства и характерные особенности тока должны выявляться в данном простейшем случае весьма рельефно, не будучи замаскированными привходящими второстепенными обстоятельствами. Следовательно, именно на токе в сверхпроводящей цепи необходимо сосредоточить наше вни-

мание, если мы считаем своевременным пересмотреть вопрос о природе тока и по возможности приблизиться к пониманию того, что имеет особо существенное значение в этом электромагнитном явлении.

б. Случай электрического тока в сверхпроводящем слое был в общих чертах рассмотрен еще Максвеллом чисто теоретически.[1] Он пришел к ряду заключений, сущность которых сводится к следующему:

1. Нормальная составляющая магнитной индукции сохраняет постоянное значение во всех точках сверхпроводящего слоя.

2. Если сверхпроводящий слой образует замкнутую поверхность, никакие изменения магнитного поля вне этой замкнутой поверхности не могут влиять на величину магнитной индукции в объеме, ограниченном данной поверхностью.

3. Объем, со всех сторон ограниченный сверхпроводящим слоем, оказывается совершенно непроницаемым для магнитных линий внешнего (по отношению к этому объему) потока.

Собственно говоря, положения 2 и 3 характеризуют собою предельный случай поверхностного эффекта или скин-эффекта, имеющий место при $r=0$. Это есть случай, так сказать, перманентного скин-эффекта.

Через 40 лет после того, как Максвелл теоретически обследовал свойства сверхпроводящего слоя, его выводы были полностью подтверждены непосредственными опытами Камерлинг-Оннеса, который нашел, наконец, способ реального осуществления сверхпроводников.

В качестве прямого следствия результатов, полученных Максвеллом, и в полном согласии с экспериментальными достижениями Камерлинг-Оннеса мы можем к трем вышеприведенным положениям добавить еще такое:

4. Магнитный поток, сцепляющийся с некоторым контуром, полностью состоящим из сверхпроводника, неизменно сохраняет свою величину и не может быть изменен никакими физическими воздействиями.

Что касается этого положения 4, то оно было сформулировано еще в 1919 г. Липпманом[2] в связи с рассмотрением некоторых математических соотношений, основанных на результатах опытов Камерлинг-Оннеса. Положение это можно рассматривать как следствие, вытекающее из положения 3 и из принципа непрерывности магнитного потока. Когда некоторый магнитный поток Φ_0 сцепляется со сверхпроводящим контуром, то каждая отдельная магнитная линия этого потока, по причине ее непрерывности и вследствие непроницаемости для нее сверхпроводящего вещества, никак не может полностью выйти из охвата данным контуром. Возможны только известные структурные преобразования магнитной линии. Если мы будем стремиться каким-либо способом удалить магнитную линию от охватывающего ее сверхпроводящего контура, самое большее, чего мы можем достигнуть, — это будет отпочкование от основной магнитной линии соответствующего магнитного звена, нанизанного на контур, так что полное количество магнитных линий, сцепляющихся с рассматриваемым контуром, всё же останется неизменным. Таким образом, пучок магнитных линий, охватываемый сверхпроводящим контуром, как бы сковывается, и число магнитных линий в этом пучке сохраняется всегда одно и то же, т. е. всегда имеем

$$\Phi_0 = \text{Const.}$$

---

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, §§ 654 и 655.

[2] Lippmann. Comp. Rend. de l'Acad. des Sc. (Paris), t. 168, 1919, p. 73.

На этом замечательном свойстве сверхпроводящих цепей мы подробнее остановимся в следующем параграфе.[1]

§ 51. Возникновение индуктированного тока в сверхпроводящей цепи

Основной опыт Камерлинг-Оннеса, открывшего явление сверхпроводимости, заключался в общих чертах в следующем. Он составил замкнутую цепь из свинцовой проволоки и расположил ее в каком-либо внешнем магнитном поле. Таким путем создавался некоторый магнитный поток Ф, сцеплявшийся с данным проводящим контуром. Во время установления этого потока Ф в замкнутой цепи индуктировался ток, который нормально вскоре прекращался, так как свинцовая проволока вначале имела обычную комнатную температуру и обладала свойственным ей конечным сопротивлением, благодаря чему энергия индуктированного тока полностью расходовалась на образование джоулева тепла. По прошествии достаточного промежутка времени можно было не сомневаться в том, что указанный первоначально индуктированный ток совершенно прекратился. После этого свинцовая проволока охлаждалась до температуры кипящего жидкого гелия, отличавшейся от абсолютного нуля лишь на несколько градусов (шкалы Кельвина). Затем источник внешнего магнитного поля удалялся. В цепи из охлажденной свинцовой проволоки снова, конечно, индуктировался ток. Однако в данном случае ток этот уже не прекращался, но в течение ряда часов сохранялся, практически не ослабевая до тех пор, пока свинцовая проволока оставалась в кипящем гелии. Наличие тока в описываемом опыте констатировалось по наличию магнитного потока, органически связанного с замкнутым контуром из свинцовой проволоки и, очевидно, представлявшего собой поток самоиндукции Φ_s, который принадлежал индуктированному в этом контуре току i. В том, что поток самоиндукции Φ_s действительно существует, можно было убедиться, наблюдая соответствующие воздействия его на подносимую магнитную стрелку. Необходимо было заключить, как это и сделал Камерлинг-Оннес, что свинцовая проволока при температуре кипящего гелия теряет способность преобразовывать энергию электрического тока в джоулево тепло и, таким образом, приобретает свойство *сверхпроводимости*, которое характеризуется соотношением

$$r = 0.$$

Рассмотрим теперь некоторые обстоятельства, сопровождающие процесс индуктирования тока в сверхпроводящем контуре.[1] Когда от этого контура удаляется источник внешнего магнитного поля, поток Ф, первоначально сцеплявшийся с контуром и бывший в полном смысле слова внешним магнитным потоком, постепенно уменьшается. В связи с этим в контуре индуктируется электродвижущая сила

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

[1] При изложении настоящего § 51, а также во всех дальнейших рассуждениях, касающихся свойств сверхпроводников, мы предполагали и всегда будем предполагать, что сила внешнего магнитного поля ни в коем случае не достигает критического значения, т. е. такого значения, при котором свойство сверхпроводимости разрушается.

благодаря чему в нем появляется ток i. Но возникновение тока i должно быть связано с наличием противодействующей электродвижущей силы самоиндукции

$$e_s = -\frac{d\Phi_s}{dt}.$$

Получаем следующее общее уравнение электродвижущих сил в данной цепи:

$$-\frac{d\Phi}{dt} - \frac{d\Phi_s}{dt} = ri.$$

Чему же равняется величина ri? Так как мы имеем дело со сверхпроводящей цепью, то сопротивление r равно нулю. С другой стороны, сила тока i ни в коем случае не может быть бесконечно большой величиной. Это вытекает из того, что i имеет характер скорости в электрокинетической системе, обладающей своего рода инерцией. Непосредственный опыт также свидетельствует о некотором безусловно конечном значении силы тока i. Поэтому для сверхпроводящей цепи всегда будем иметь

$$ri = 0,$$

на основании чего пишем

$$-\frac{d\Phi}{dt} - \frac{d\Phi_s}{dt} = 0.$$

Отсюда получаем:

$$\Phi + \Phi_s = \text{Const.}$$

Совершенно ясно, что сумма $\Phi + \Phi_s$ есть полный магнитный поток, сцепляющийся со сверхпроводящим контуром в каждый данный момент времени. Обозначая этот поток через Φ_0, имеем

$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_s = \text{Const.}$$

Это и есть основное соотношение, характеризующее результаты опытов Камерлинг-Оннеса со сверхпроводниками. Никакими доступными нам средствами мы не можем изменить величину полного магнитного потока Φ_0, сцепляющегося с проводящим контуром, если в нем нет рассеяния энергии, т. е. если в нем не выделяется джоулево тепло и он оказывается таким образом сверхпроводящим ($r = 0$).

Пока с таким сверхпроводящим контуром сцепляется лишь внешний магнитный поток Φ, в контуре нет электрического тока, и, следовательно, поток самоиндукции Φ_s полностью отсутствует. Иными словами, начальные условия будут таковы:

$$\Phi_s = 0,$$

$$\Phi_0 = \Phi.$$

В процессе удаления источника внешнего магнитного поля поток Φ начнет уменьшаться, но эта убыль в точности восполняется положительным приращением возникающего потока самоиндукции Φ_s, связанного с индуктируемым током i. Во всё время этого процесса имеем

$$\Phi + \Phi_s = \Phi_0 = \text{Const.},$$

$$\Delta\Phi + \Delta\Phi_s = 0,$$

$$\Delta\Phi_s = -\Delta\Phi.$$

Когда внешний магнитный поток Φ совершенно исчезнет, на смену ему становится поток самоиндукции Φ_s, так что величина полного магнитного потока Φ_0 остается неизменной. И окончательно получаем

$$\Phi = 0,$$

$$\Phi_0 = \Phi_s.$$

Итак, после того как завершится процесс индуктирования тока в сверхпроводящей цепи, никакого внешнего магнитного потока уже не будет, а образующийся вместо него поток, внутренне связанный с контуром цепи, воспринимается наблюдателем в качестве потока самоиндукции.

На основании известного соотношения

$$\Phi_s = Li,$$

где L есть коэффициент самоиндукции рассматриваемой сверхпроводящей цепи, можем написать

$$i = \frac{\Phi_s}{L}.$$

Последнее выражение позволяет найти силу тока i, исходя из величины потока самоиндукции Φ_s, который может быть известен, например, благодаря предварительному измерению внешнего магнитного потока Φ. Коэффициент же самоиндукции L является функцией только геометрических координат и может быть рассчитан по заданным размерам контура цепи. Это есть простейший и совершенно точный метод определения силы тока, индуктированного в сверхпроводящей цепи.

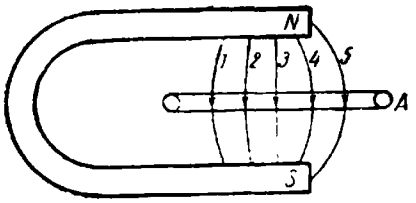


Рис. 131.

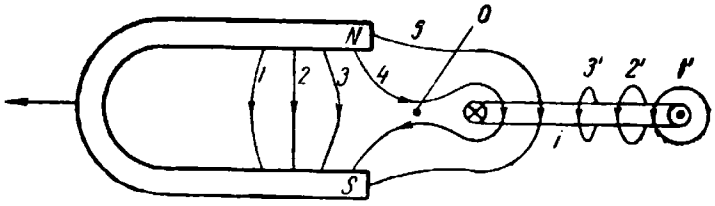


Рис. 132.

Всё сказанное должно быть дополнено еще указанием на то, что во время протекания процесса индуктирования тока в сверхпроводящей цепи мы встречаемся со структурными преобразованиями магнитного потока, в основном рассмотренными уже в § 32 главы IV. Там, однако, мы должны были сделать ряд оговорок касательно начальной стадии преобразований магнитного потока в генераторном процессе. В случае же сверхпроводника, вследствие его полной непроницаемости для внешних магнитных линий, подобные оговорки оказываются совершенно излишними. Деформирование магнитных линий внешнего потока и отпочкование от них магнитных звеньев потока самоиндукции начинаются сразу же, и эти преобразования ни в какой степени не зависят от того, имеется ли уже электрический ток в цепи, или ток сначала полностью отсутствует. Таким образом, преобразования магнитного потока при генераторном процессе в сверхпроводящей цепи протекают в наиболее чистом виде и без всяких осложняющих обстоятельств. Этот простейший случай индуктирования тока иллюстрируется схематическими рисунками 131, 132 и 133.

Представим себе (рис. 131), что между полюсами N и S некоторого подковообразного магнита расположена сверхпроводящая цепь, имеющая, например, форму кольца A из свинцовой проволоки, которая была надлежащим образом охлаждена уже после внесения ее во внешнее магнитное поле, т. е. после прекращения в ней первоначально индуктированного тока. Итак, в условиях, показанных на рис. 131, в сверхпроводящем кольце A никакого тока нет, и с этим кольцом сцепляется лишь внешний магнитный поток Ф, условно принятый, ради упрощения всех дальнейших рассуждений, состоящим из пяти магнитных линий (*1*—*5*). Следовательно, вначале мы имеем

$$\Phi = 5 \text{ магнитных линий},$$
$$\Phi_s = 0,$$
$$i = 0.$$

Предположим теперь, что кольцо A остается неподвижным, а магнит NS удаляется влево (рис. 132). При этом произойдут структурные преобразования магнитного потока, в общем совершенно подобные тем, которые были пояснены рис. 88—90. На рис. 132 показан момент преобразований, когда от магнитных линий *1*, *2* и *3* внешнего потока Ф уже отделились магнитные звенья *1'*, *2'* и *3'*, которые нанизались на кольцо A и вошли в состав потока самоиндукции Φ_s, относящегося к индуктируемому току i. Магнитные же линии *4* и *5* находятся в состоянии преобразования, предшествующем отпочкованию магнитных звеньев, причем магнитная линия *5* только вытянута в виде петли, а магнитная линия *4* изображена в стадии сильного деформирования непосредственно перед моментом контакта в точке O сблизившихся противоположно направленных участков. Для состояния системы, представленного на рис. 132, имеем

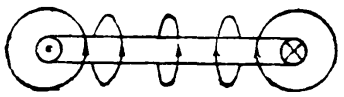


Рис. 133.

$$\Phi = 2,$$
$$\Phi_s = 3,$$
$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_s = 5 \text{ магнитных линий},$$
$$i \neq 0.$$

На рис. 133 сверхпроводящее кольцо A представлено для случая, когда магнит NS совершенно удален и процесс индуктирования тока уже закончился. При этом получается

$$\Phi = 0,$$
$$\Phi_s = 5,$$
$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_s = 5 \text{ магнитных линий}.$$

Таким образом, полный магнитный поток, $\Phi_0 = \Phi + \Phi_s$, сцепляющийся со сверхпроводящим контуром A, неизменно и безусловно всегда сохраняет свою величину, ради примера принятую в описанном случае равной пяти магнитным линиям. Внешний магнитный поток Ф сменился в конце концов равноценным ему в количественном отношении потоком самоиндукции Φ_s, а индуктированный ток достиг своего наибольшего

значения, соответствующего конфигурации и геометрическим размерам цепи.

Хотя мы уже неоднократно имели повод высказываться по данному вопросу, всё же считаем небесполезным еще раз подчеркнуть, что рассмотренная принципиальная схема преобразований магнитного потока (рис. 131—133) обязательно вытекает из признания объективной реальности магнитного потока со всеми его свойствами. Совершенно невозможно представить себе, чтобы происходило что-либо иное. В случае обычных проводников, электрическое сопротивление которых не равно нулю, самые существенные особенности генераторного индуктивного процесса, характеризуемые главным образом почкованием магнитных звеньев, могут быть в значительной мере замаскированы, но всё это с полной очевидностью выступает на первый план, когда мы имеем дело со сверхпроводящими цепями и когда возникающий поток самоиндукции оказывается единственным, пока известным, несомненным признаком индуктирования тока.

Всё сказанное позволяет считать в высокой степени достоверным предположение, что *процесс индуктирования тока в некотором проводе, образующем замкнутую цепь, вообще сводится в основном к преобразованиям внешнего магнитного потока, охватываемого контуром цепи, в поток самоиндукции, который внутренне и органически связан с процессом, происходящим в рассматриваемой цепи.*

§ 52. Основная роль потока самоиндукции в сверхпроводящих цепях

а. Рассматривая различные случаи электрического тока в сверхпроводниках, мы встречаемся с целым рядом обстоятельств, не вполне гармонирующих с нашими традиционными представлениями об этом электрокинетическом процессе. В сверхпроводящих цепях особенно ярко выступает доминирующая роль магнитного потока самоиндукции как некоторого основного фактора, определяющего собой общий характер явления, называемого электрическим током. Как было разъяснено в предыдущем параграфе, оперируя именно с потоком самоиндукции, мы можем проще всего получить количественные соотношения, которыми непосредственно выражается сила тока в любой сверхпроводящей цепи.

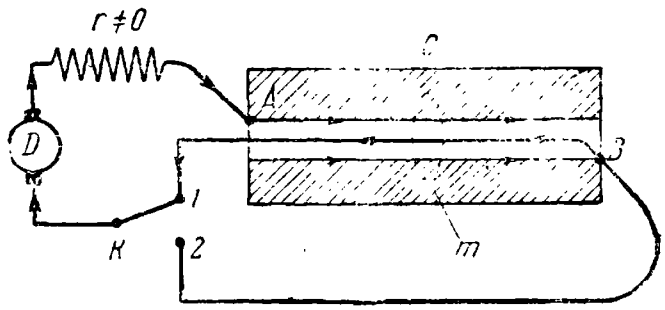


Рис. 134.

Для пояснения сказанного об особенной роли потока самоиндукции рассмотрим ряд примеров прохождения тока по сверхпроводнику, входящему в состав обычной цепи, в которой постоянный ток поддерживается от некоторого генератора.

б. Представим себе сверхпроводящий цилиндр C, входящий в состав некоторой цепи и снабженный продольным каналом (рис. 134). Допустим, кроме того, что до сообщения цилиндру C состояния сверхпроводимости, т. е. перед его охлаждением до надлежащей низкой температуры, во всех точках его было:

$$H=0.$$

Для достижения этого необходимо, конечно, иметь предварительно разомкнутую цепь. К точкам A и B, расположенным в начале и в конце канала, присоединены провода от прочих частей цепи, в которую включен какой-либо генератор постоянного тока, например динамомашина D, и некоторое добавочное сопротивление r, не равное нулю. Это сопротивление при данной электродвижущей силе генератора определяет собою силу постоянного тока в цепи. При помощи переключателя K точка B может быть присоединена к цепи либо проводом, проходящим внутри канала, либо внешним проводом. На рис. 134 переключатель изображен в положении *1*. В таком случае электрический ток потечет только по поверхности, ограничивающей канал, но не по внешней поверхности сверхпроводящего цилиндра C и не внутри объема, заполненного веществом стенок цилиндра. Этот именно характер распределения тока в сверхпроводящей части цепи и показан на рис. 134 соответствующими стрелками. Что распределение тока действительно должно быть таким, это вытекает из следующих соображений. Применяя закон магнитодвижущей силы для какого угодно замкнутого контура, взятого внутри толщи стенок цилиндра C и не охватывающего канала, мы будем иметь

$$\oint H\cos\alpha\, dl = 0,$$

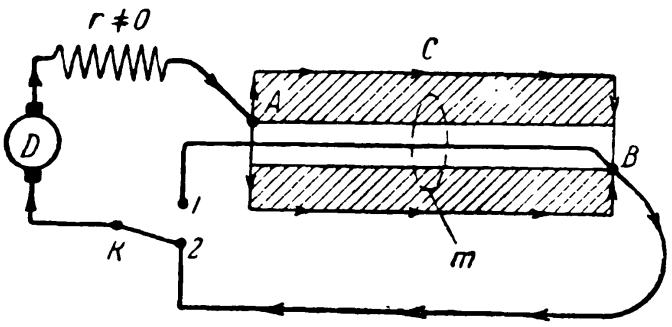


Рис. 135.

так как после сообщения цилиндру свойства сверхпроводимости во всех точках внутри его стенок должно было неизменно сохраняться первоначальное значение магнитной силы ($H=0$). Следовательно, электрический ток будет совершенно отсутствовать во всех точках в объеме рассматриваемого сверхпроводника. По той же причине оказывается равным нулю и линейный интеграл магнитной силы, взятый вдоль замкнутого контура m, который мы можем представить себе в толще сверхпроводника так, чтобы он охватывал канал. Но в этом последнем случае электрический ток заведомо идет по проводу, проложенному внутри канала. На основании этого заключаем, что по внутренней поверхности стенок канала идет такой же ток, но в обратном направлении.

Переведя переключатель K в положение *2* (рис. 135), мы получим уже иное распределение тока по поверхности сверхпроводящего цилиндра C между теми же точками A и B. Это с очевидностью вытекает из того, что и в данном случае линейный интеграл магнитной силы вдоль замкнутого контура m неизменно остается равным нулю, но при этом равна нулю и сила тока вдоль провода, проложенного в канале. Следовательно, электрический ток в этом случае будет протекать между точками A и B не по поверхности, ограничивающей канал, а по внешней поверхности цилиндра C, как показано стрелками. Переводя переключатель K из положения *1* в положение *2* или обратно, мы можем, таким образом, весьма существенно изменять картину распределения тока по поверхности сверхпроводящего цилиндра C между теми же самыми точками A и B.

Характерно то, что в первом случае (рис. 134) магнитный поток самоиндукции заполняет собою пространство внутри канала, а снаружи цилиндра C никакого магнитного потока нет. Во втором же случае (рис. 135) поток

самоиндукции совершенно отсутствует внутри канала, но существует снаружи цилиндра C. В связи с этим необходимо отметить следующее весьма важное обстоятельство, с полной определенностью обнаружившееся в рассмотренных двух случаях:

Распределение электрического тока по поверхности сверхпроводника зависит исключительно от распределения потока самоиндукции в пространстве, и этот ток протекает не как иначе, а именно по поверхности соприкосновения потока самоиндукции со сверхпроводником.

в. На рис. 136 и 137 представлены другие варианты случая с тем же сверхпроводящим, полым цилиндром. Подводя ток к цилиндру C в точках A и B, расположенных внутри канала на некотором расстоянии от концов так, как это показано на рис. 136, и замыкая цепь рубильником K, мы получим распределение тока не по кратчайшему расстоянию между точками A и B. Расстояние это может быть очень невелико, но ток от точки A пойдет по внутренней поверхности канала влево, затем по торцевой поверхности в радиальном направлении, по наружной поверхности цилиндра C вправо, опять по торцевой поверхности к центру и по части канала до точки B. Через участок канала AB ток вовсе не будет протекать. Сближая точки A и B до совпадения их с одним и тем же поперечным сечением канала, мы и в этом случае будем иметь такое же распределение тока по поверхности сверхпроводящего полого цилиндра C, что и в случае, изображенном на рис. 136. Наконец, при дальнейшем передвижении точки A вправо, а точки B влево мы получим расположение этих точек, представленное на рис. 137. В этом случае по внешней поверхности цилиндра C, по торцевым поверхностям и по концевым участкам поверхности, ограничивающей канал, будет протекать тот же ток i, что и по внешней части цепи. Но по поверхности, ограничивающей средний участок канала между точками A и B, будет протекать ток $2i$. Направление всех этих токов представлено на рис. 137 соответствующими стрелками. Прилагая попрежнему закон магнитодвижущей силы к различным замкнутым контурам, мы можем убедиться, что в случаях, изображенных на рис. 136 и 137, действительно всё будет происходить именно так, как указано. И в этих случаях *распределение тока по поверхности сверхпроводника полностью подчиняется распределению магнитного потока самоиндукции.* Электрический ток, который проходит по поверхности, ограничивающей канал, находится в зависимости от того, как в этом канале размещается поток самоиндукции.

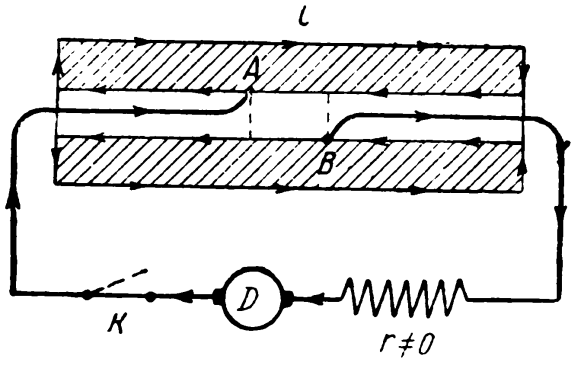


Рис. 136.

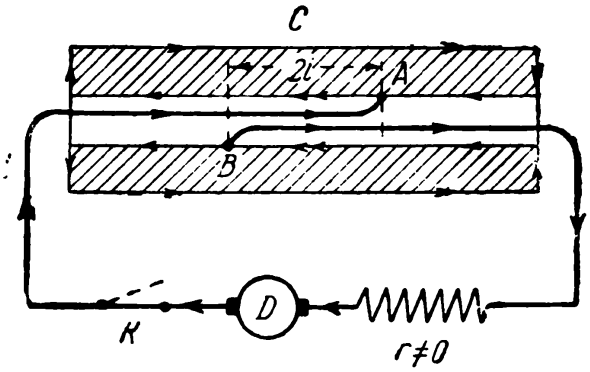


Рис. 137.

Таким образом, из рассмотрения схем, представленных на рис. 134—137, мы приходим к заключению, что в *сверхпроводниках движение*

электричества в процессе тока совершается вдоль пути, полностью определяемого не геометрическими условиями возможного перемещения электричества самого по себе, а характером распределения потока самоиндукции в пространстве.

Этот общий вывод подтверждается и в случае сверхпроводников, имеющих какую угодно иную форму, помимо рассмотренной цилиндрической.

г. На рис. 138 представлен разрез полого сверхпроводящего шара, в стенке которого проделано отверстие P. Внешняя цепь присоединена к точкам A (внутри шара) и B (на внешней поверхности шара). Прочие

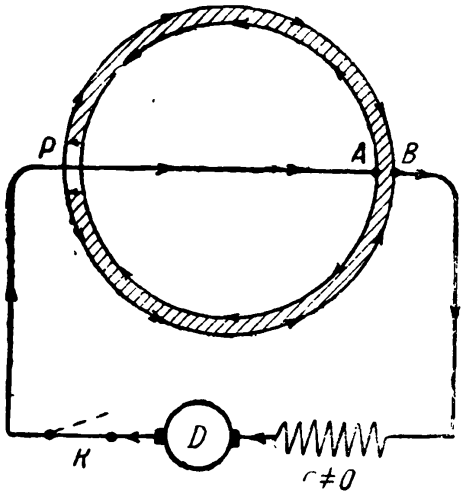


Рис. 138.

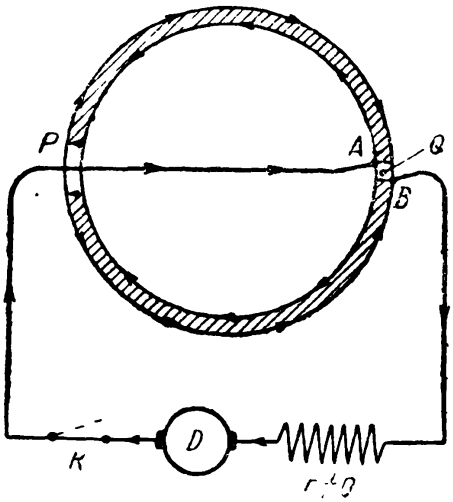


Рис. 139.

части цепи, K, D и $r \neq 0$, имеют то же назначение, что и в схемах, изображенных на рис. 136 и 137. Сообщая веществу шара состояние сверхпроводимости до замыкания цепи рубильником K и включая затем рубильник, мы получим указанное на рисунке распределение тока по внутренней и внешней поверхностям шара, как бы мало ни было расстояние между точками A и B, равное толщине стенки шара. Это распределение тока в основном не изменилось бы, если бы в стенке шара существовало второе отверстие Q, у краев которого лежат точки A и B, как показано на рис. 139. Электрический ток не пойдет сквозь это отверстие Q по ограничивающей его поверхности, хотя такой путь и представляет собою кратчайшее расстояние между точками A и B.

Действительно, вообразим некоторый замкнутый контур, окружающий отверстие Q и полностью проходящий внутри вещества стенки. Магнитная сила H и магнитная индукция B во всем объеме, занимаемом толщей стенки сверхпроводящего полого шара, были равны нулю до включения рубильника K. Те же условия сохранятся и после замыкания цепи. Попрежнему для всех точек внутри сверхпроводника мы будем иметь неизменно:

$$H = 0,$$
$$B = 0.$$

Следовательно, для указанного замкнутого контура, окружающего отверстие Q, получаем

$$\oint H \cos\alpha \, dl = 0,$$

т. е. сила тока, проходящего сквозь этот контур, равна нулю. Так должно быть.

Отсутствие тока между точками A и B сквозь отверстие Q можно объяснять и иначе. Если бы такой ток существовал, то в толще стенки шара должен был бы существовать и соответствующий поток самоиндукции, окружающий предполагаемый ток. Однако, как указано было выше, во всех точках внутри сверхпроводящего шарового слоя магнитная индукция неизменно остается равной нулю. Таким образом, в описанных условиях нет места для потока самоиндукции, который мог бы охватывать ток сквозь отверстие Q. Следовательно, не может быть и тока сквозь данное отверстие.

Итак, в рассматриваемой замкнутой цепи электрический ток проходит от точки A к точке B не по кратчайшему расстоянию сквозь отверстие Q. В то же время поток самоиндукции заполняет всю внутреннюю полость шара совершенно так же, как и в случае, представленном на рис. 138. Есть поток самоиндукции и в пространстве вокруг шара. В связи с этим и вследствие этого электрический ток будет проходить по внутренней и внешней поверхностям шарового слоя, как показано стрелками на рис. 139.

Если электрический ток по поверхности сверхпроводников осуществляется движением тех же электронов, которыми согласно современным представлениям обусловлена обычная металлическая проводимость, то необходимо признать, что *в рассмотренных случаях сверхпроводимости проявляются какие-то не известные доселе и весьма, так сказать, удивительные свойства электронов.* Они не в состоянии перемещаться по кратчайшему расстоянию между точками A и B (рис. 136 и 139), хотя сверхпроводник на этом пути сам по себе обладает теми же физическими свойствами, что и на длинном пути действительного прохождения тока. Эти электроны оказываются совершенно несамостоятельными и несвободными. Они как-то подчиняются потоку самоиндукции, двигаясь только по пути, предписываемому им этим магнитным потоком. *Где поток самоиндукции может существовать у поверхности сверхпроводника, там разрешается движение электронов по этой поверхности. Где же поток самоиндукции не может возникать, там и соответствующее движение электронов запрещено.*

д. В рассмотренных выше случаях мы встречались с таким распределением электрического тока по поверхности сверхпроводника, когда характер этого распределения полностью подчиняется внешним по отношению к сверхпроводнику обстоятельствам, именно распределению потока самоиндукции во внешнем пространстве. По своему произволу мы можем изменять эти внешние обстоятельства, изменяя тем самым и ток, проходящий по поверхности сверхпроводника. Наконец, создавая обстановку, при которой в некоторой части системы поток самоиндукции не может возникать, мы не получаем там и электрического тока, хотя бы общие геометрические условия, повидимому, и допускали это (см. рис. 139, отверстие Q). Всё это имело место в случаях, когда во всех точках внутри сверхпроводника магнитная индукция равна нулю, т. е. магнитный поток отсутствует в объеме сверхпроводника. Если же мы сначала, пользуясь какими-либо средствами, создадим магнитный поток в некотором объеме, со всех сторон окруженном проводящим слоем, а затем сообщим этому последнему свойство сверхпроводимости и далее устраним внешний источник магнитного поля, то возникнет электрический ток, проходящий по данному сверхпроводящему слою, и при этом зафиксируется магнитный поток, проходивший ранее через рассматриваемый объем. Это объясняется тем, что нормальная состав-

ляющая магнитной индукции во всех точках сверхпроводящего слоя будет сохранять постоянным раз установленное значение (§ 50).

В этом отношении особенно интересен опыт с полым тонкостенным шаром из свинца. Поместим этот полый свинцовый шар между полюсами электромагнита и затем сообщим свинцу свойство сверхпроводимости, охладив его до температуры кипящего гелия. Магнитный поток внутри шара окажется при этом как бы прочно зафиксированным и жестко связанным с объемом полого шара подобно тому, как если бы мы намагнитили шар из магнитной стали с очень большой коэрцитивной силой. „Намагниченный" таким образом сверхпроводящий полый шар представлен на рис. 140. Вверху рисунка показан характер связанного с этим шаром магнитного потока при отсутствии посторонних источников магнитного поля. Верхняя часть шара будет обнаруживать маг-

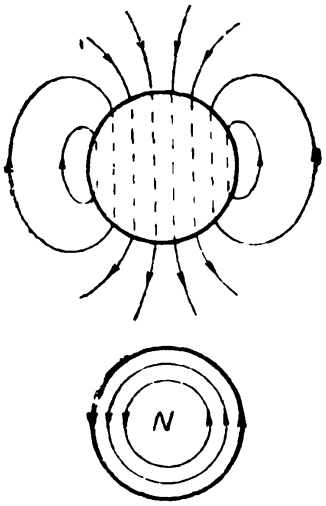


Рис. 140.

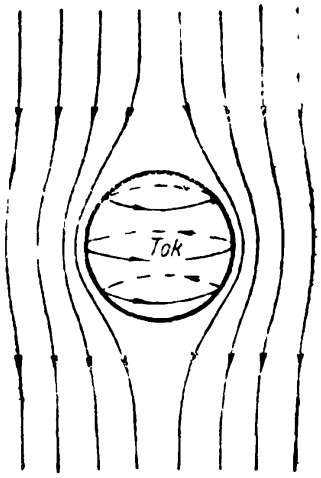


Рис. 141.

нитную полярность одного знака (в данном случае *S*), а нижняя часть шара — полярность другого знака (*N*). Ток, индуктированный на поверхности сверхпроводящего полого шара, показан стрелками внизу рис. 140 в предположении, что мы смотрим на „северный полюс".

Подобное же распределение индуктированного тока по поверхности сверхпроводящего шара может быть получено и при внесении его в некоторое внешнее магнитное поле уже после того, как этому шару предварительно было сообщено свойство сверхпроводимости. Магнитная индукция в объеме сверхпроводящего шара будет неизменно оставаться равной нулю. Внешнее же магнитное поле при этом деформируется так, как если бы магнитная проницаемость шара была равна нулю. Перераспределение магнитных линий внешнего поля в описываемом случае (рис. 141) свидетельствует о наличии индуктированного тока на поверхности шара. Получившееся искривление магнитных линий, огибающих сверхпроводящий шар, можно рассматривать как результат совмещения и слияния внешнего магнитного потока и потока самоиндукции, связанного с индуктированным током. Самостоятельно же этот поток самоиндукции не может существовать в данных условиях.

Таким образом, можно сказать, что *по поверхности сверхпроводника течет электрический ток там, где эта поверхность находится в соприкосновении с ясно выраженным потоком самоиндукции* (рис. 134 — 140) *или с внешним магнитным потоком, нормальное распределение которого в окружающем пространстве нарушено внесением сверхпроводника и возникновением индуктированного*

на его поверхности тока (рис. 141). В последнем случае полученное окончательное распределение магнитных линий можно формально рассматривать в качестве результата полного слияния потока самоиндукции с внешним магнитным потоком.

е. Как известно, электронная теория оказывается не в состоянии объяснить явления сверхпроводимости. В этом отношении встречается ряд непреодолимых затруднений. Надо полагать, что процесс протекания электричества по сверхпроводнику должен рассматриваться как-то иначе,

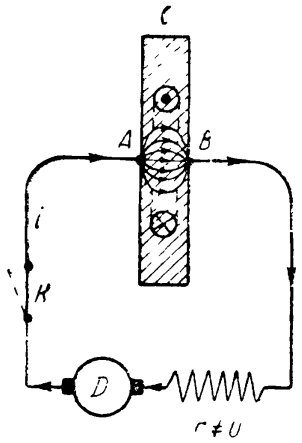


Рис. 142.

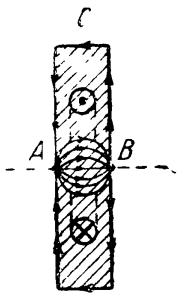


Рис. 143.

чем это обычно принято с точки зрения примитивной теории, не принимающей во внимание особенно важной роли физической реальности, которую мы называем магнитным потоком.

Рассмотренные выше случаи сверхпроводимости могут подать повод думать, что электричество способно течь только по поверхности сверхпроводника. Однако такое заключение, вообще говоря, было бы неправильным. Повидимому, электрический ток может проходить и через тело сверхпроводника. В виде примера рассмотрим случай, представленный на рис. 142, где C есть свинцовый диск, который изображен в разрезе. К центральным точкам A и B присоединены провода от внешней цепи, заключающей в себе генератор D, реостат r и рубильник K. До охлаждения свинцового диска замыкаем цепь рубильником K. При этом электрический ток пойдет сквозь толщу диска C и внутри него разместится также соответствующая часть общего потока самоиндукции в форме кольцевых магнитных линий, на всем своем протяжении находящихся в объеме диска. Всё это грубо схематически показано на рис. 142. Начнем далее охлаждать свинцовый диск в кипящем гелии. Для облегчения условий охлаждения мы можем сколь угодно ослабить силу тока i с целью уменьшения джоулева тепла, нормально выделявшегося в диске при обычной температуре. В конце концов мы должны сообщить свинцовому диску C свойство сверхпроводимости. Следует предполагать, что при этом в объеме диска зафиксируются кольцевые магнитные линии потока самоиндукции, и сквозь тело диска будет неизменно проходить ток i. Хотя непосредственным опытом убедиться в этом мы не имеем никакой возможности, однако в настоящее время нет оснований для того, чтобы считать более правдоподобным что-либо иное. Если затем разомкнуть рубильник K, ток во внешних частях цепи прекратится. В то же время ток, протекавший через толщу диска между точками A и B, должен

полностью сохраниться, но только теперь этот ток i, продолжая проходить сквозь диск, будет далее замыкаться через поверхность сверхпроводящего диска, как показано на рис. 143. Так должно быть, если и в данном случае магнитные линии окажутся зафиксированными в объеме сверхпроводника подобно тому, как это получается в опыте с полым свинцовым шаром (рис. 140). И так как линейный интеграл магнитной силы вдоль контура некоторой магнитной линии в объеме сверхпроводящего диска C неизменно должен сохранять свою величину, то, следовательно, должен существовать и прежний ток, охватываемый данным контуром. Никакими внешними воздействиями мы не можем теперь как-либо изменить силу тока i, протекающего через толщу сверхпроводящего диска. Если мы вновь замкнем рубильник K и как угодно при этом будем варьировать сопротивление r (рис. 142), мы будем в состоянии изменять лишь силу тока, протекающего по поверхности сверхпроводящего диска C.

ж. Итак, электрический ток может протекать или только по поверхности сверхпроводника, или же, надо полагать, и по всему его объему. Всё зависит лишь от характера распределения потока самоиндукции в пространстве. Когда поток самоиндукции полностью расположен вне сверхпроводника, электрический ток проходит исключительно по его поверхности, и мы по существу имеем дело с предельным случаем скин-эффекта в самом чистом виде (перманентный скин-эффект при сопротивлении проводника, равном нулю). Если же некоторые магнитные линии потока самоиндукции на всем своем протяжении могут оказаться зафиксированными в объеме сверхпроводника и жестко с ним связанными, то электрический ток, повидимому, может существовать и внутри сверхпроводника. Во всяком случае несомненно следующее. В явлениях сверхпроводимости мы встречаемся с обстоятельствами, не укладывающимися в рамки наших обычных представлений об электрическом токе. *Несомненна ошибочность общепринятого в настоящее время предположения, будто бы электрический ток, проходящий по некоторому проводу, „возбуждает" в окружающем пространстве магнитное поле в форме потока самоиндукции.* Несомненно, что основным фактором в электромагнитном процессе, называемом „электрическим током", является именно поток самоиндукции, а собственно движение электричества вдоль провода оказывается лишь каким-то сопутствующим или, так сказать, вторичным обстоятельством, хотя и безусловно необходимым, но всецело подчиняющимся пространственному распределению потока самоиндукции.

§ 53. Особенные случаи индуктирования тока на поверхности сверхпроводника

а. Во всех рассмотренных до сих пор примерах возникновения индуктированного тока мы встречались с соответствующим деформированием внешнего магнитного потока. Это деформирование нормально сопровождалось структурными преобразованиями внешнего потока, а также отделением от него магнитных линий потока самоиндукции, который охватывался контуром цепи, подвергавшейся индуктивным воздействиям. Остановимся теперь на случаях индуктирования тока, характеризуемых отсутствием каких бы то ни было изменений формы магнитных линий внешнего потока.

Представим себе некоторый тонкостенный полый свинцовый тор T, т. е. тело вращения в виде кольца с неизменным поперечным сечением (рис. 144).[1]

В рассматриваемом случае внутри тора отсутствует какое-либо обычное вещество и остается лишь торообразная оболочка из тонкого слоя свинца. Допустим, что до сообщения этому полому тору свойства сверхпроводимости он был помещен в магнитном поле прямолинейного тока i_0, протекающего по проводу AB, который проходит сквозь центральное отверстие тора вдоль его оси симметрии. Во всех дальнейших рассуждениях всегда будем предполагать, что величина силы тока i_0 остается одной и той же. На рис. 144 направление тока и магнитных линий показано надлежащими стрелками и значками. В данном случае кольцеобразные магнитные линии поля тока i_0 заполняют весь объем полого тора T, нигде не пересекая его поверхностного слоя. Иными словами, во всех точках поверхности тора нормальные составляющие магнитной индукции и магнитной силы равны нулю. Обозначим через Φ_0 магнитный поток, пронизывающий любое поперечное сечение тора T в рассматриваемых условиях.

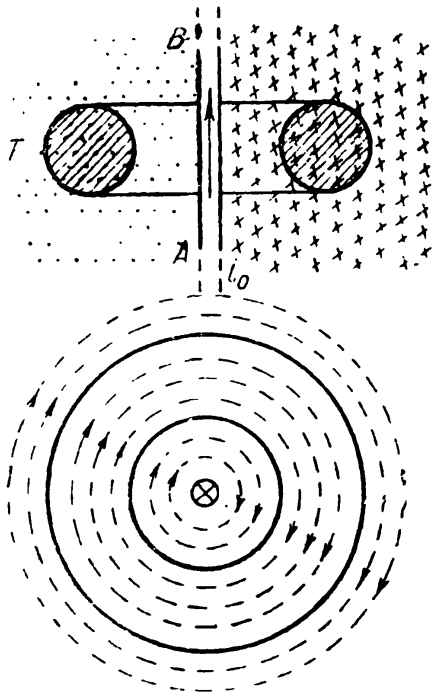


Рис. 144.

Охладим теперь полый свинцовый тор T до температуры кипящего гелия, т. е. сообщим ему свойство сверхпроводимости. Затем прервем ток i_0. Все магнитные линии, бывшие снаружи тора T, при этом исчезнут. Магнитный же поток Φ_0, находящийся внутри сверхпроводящего полого тора, останется неизменно зафиксированным, как был, на месте. Вместе с тем возникнет индуктированный ток, протекающий по поверхности тора в направлении, показанном стрелками на рис. 145. Магнитный поток Φ_0 мы теперь должны рассматривать в качестве потока самоиндукции Φ_s, охватываемого возникшим индуктированным током, причем, конечно, имеем:

$$\Phi_s = \Phi_0.$$

Что касается полного тока i_1, обтекающего поверхность сверхпроводящего тора T, то сила этого тока должна быть в точности равна i_0 — силе основного тока, первоначально протекавшего по проводу AB. Действительно, мерой тока i_0 до его прерывания можно было считать величину линейного интеграла магнитной силы H вдоль замкнутого контура какой-либо магнитной линии в объеме тора T. Магнитное же поле внутри сверхпроводника пребывает неизменно зафиксированным. Поэтому величина указанного линейного интеграла магнитной силы полностью сохранится и после размыкания тока i_0. Таким образом,

[1] На рис. 144—146, 151—153 и 172 сечения полого тора заштрихованы, так как есть основание предполагать, что все явления, описываемые для случая полого тора, останутся неизменными в случае сплошного тора. Это по существу не имеет значения.

полный ток i_1, индуктированный на поверхности тора T и со всех сторон окружающий поток самоиндукции Φ_s, оказывается равным i_0, т. е. имеем

$$i_1 = i_0.$$

В рассматриваемом случае магнитный поток Φ_0, который составлял сначала часть всего потока самоиндукции тока, идущего по проводу AB, и после прекращения этого тока i_0 превратился в поток самоиндукции Φ_s, органически связанный уже с индуктированным током i_1, не претерпевает никаких преобразований во время перехода системы из одного состояния в другое. *Магнитные линии внутри сверхпроводящего тора T всё время остаются на месте и полностью сохраняют свою форму, решительно никак не изменяясь.* Если вновь включить основной ток i_0, то индуктированный ток i_1 исчезнет, и неподвижный магнитный поток $\Phi_s = \Phi_0$ в геометрическом отношении окажется опять входящим в состав поля, окружающего ток i_0. При этом все магнитные линии данного поля будут распределены в пространстве так, как если бы сверхпроводящий тор T вовсе не существовал. Только в зависимости от чисто внешних обстоятельств мы можем трактовать всю совокупность магнитных линий, находящихся в объеме тора, либо в качестве потока Φ_0, не связанного ни с какими токами в этом торе T и потому оказывающегося, так сказать, „внешним" потоком, либо в качестве потока самоиндукции, связанного с током i_1, индуктированным на поверхности сверхпроводящего тора T.

6. Можно возбудить ток, индуктированный на поверхности рассматриваемого тора, и иным способом. Представим себе, что при сохранении общего расположения системы, изображенной на рис. 144, мы изменим порядок операций следующим образом. До пропускания тока i_0 по проводу AB, пока еще нет никакого магнитного поля в системе как снаружи, так и внутри свинцового тора T, сообщаем ему свойство сверхпроводимости. Только после этого возбуждаем магнитное поле прямолинейного тока i_0, замыкая его цепь. Возникший магнитный поток, в полном смысле слова внешний по отношению к тору, будет состоять из совокупности концентрических магнитных линий, охватывающих провод AB совершенно так же, как это было в случае, показанном на рис. 144. Однако теперь пространство внутри сверхпроводящего тора T окажется полностью изъятым от каких бы то ни было внешних магнитных воздействий. Магнитные линии тока i_0 в него не проникнут, так что во всех точках в объеме тора T останутся неизменными условия

$$B = 0,$$
$$H = 0.$$

Таким образом, в описываемом случае магнитный поток будет существовать лишь в пространстве вокруг тора T, причем у самой его поверхности кольцевые магнитные линии этого внешнего потока будут касательны к данной поверхности. Вместе с тем на ней возникнет индуктированный ток i_2 в направлении, показанном стрелками на рис. 146, т. е. в обратном по сравнению с тем, что было в предыдущем случае (рис. 145). Действительно, рассмотрим некоторый замкнутый контур, полностью находящийся внутри тора T и охватывающий провод AB. Пусть это будет, например, серединный осевой контур m внутри тора (рис. 147— пунктирная линия). Линейный интеграл магнитной силы H вдоль этого замкнутого контура должен быть равен нулю. Но мы знаем, что по про-

воду AB проходит ток i_0. Следовательно, необходимо признать, что поверхность сверхпроводящего тока T будет при этом обтекаться равным по абсолютной величине и обратным по знаку током i_2, так что обязательно будет

$$i_2 = -i_0.$$

Сквозь контур интегрирования, таким оброзом, проходит суммарный ток

$$\sum i = i_0 + i_2 = 0.$$

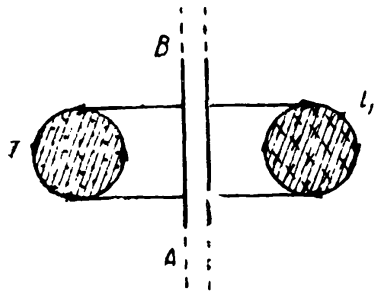


Рис. 145.

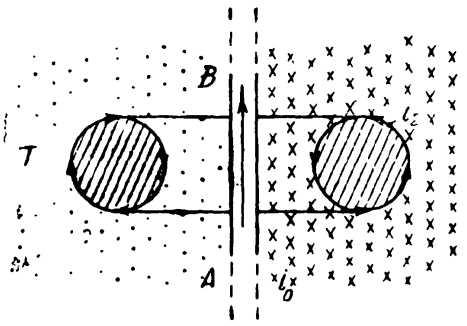


Рис. 146.

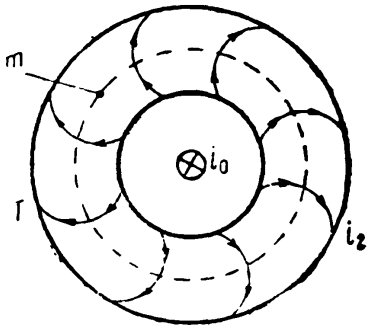


Рис. 147.

В то же время имеем такое соотношение, постоянно соблюдаемое в описываемых условиях:

$$i_2 = -i_1,$$

т. е. в случаях, представленных рис. 145 и 146, полные токи, обтекающие поверхность сверхпроводящего тора T, будут равны по абсолютной величине и обратны по направлению. И если бы мы совместили эти два тока, i_1 и i_2, как-то наложив их один на другой, то полученный результат был бы эквивалентен отсутствию всякого тока на поверхности тора T.

в. Всё, о чем мы до сих пор говорили применительно к сверхпроводящему тору T (рис. 145 и 146), можно распространить и на сверхпроводящее тело иной формы, если только соблюдаю ся следующие условия. Это тело должно иметь геометрические размеры точно такие же, как и некоторая трубка магнитной индукции, могущая возникать в рассматриваемой системе, и должно занимать в системе место указанной трубки. В таком случае присутствие данного сверхпроводящего тела в магнитном поле какого-либо тока i_0 нисколько не исказит и не деформирует общего распределения магнитных линий в системе в целом или в отдельных ее частях. В зависимости от порядка включения или выключения основного тока i_0 и от момента сообщения телу свойства сверхпроводимости мы можем получить на поверхности этого тела индуктированный ток того или иного направления.

На рис. 148 представлен случай, аналогичный тому, что было пояснено рис. 144 и 145. Цепь основного тока i_0 содержит генератор D, добавочное сопротивление r и рубильник K. Проводящее полое тело T, выполненное, например, из свинца, удовлетворяет вышеприведенным условиям, т. е. оно имеет форму какой-либо трубки магнитной индукции в поле, окружающем проводник с током i_0, и занимает место данной трубки. Ради

краткости будем называть проводящее тело, удовлетворяющее этим условиям, *эквивалентным проводником*. Итак, при замыкании тока i_0, до сообщения эквивалентному проводнику свойства сверхпроводимости, возникает магнитное поле как вне тела T, так и внутри него. При этом нормальные составляющие магнитной индукции B и магнитной силы H во всех точках поверхности эквивалентного проводника будут равны нулю. После этого, когда система придет в установившееся состояние, охлаждаем тело T до температуры кипящего гелия, т. е. превращаем его в *эквивалентный сверхпроводник*. Затем размыкаем рубильник K. Магнитные линии внутри эквивалентного сверхпроводника T останутся зафиксированными на месте, как были, а на его поверхности появится индуктированный ток, полная сила которого i_1 будет удовлетворять условию

$$i_1 = i_0,$$

причем направление обоих этих токов сквозь контур некоторой магнитной линии будет одним и тем же. Назовем разобранный случай индуктирования тока (рис. 148) случаем *I*.

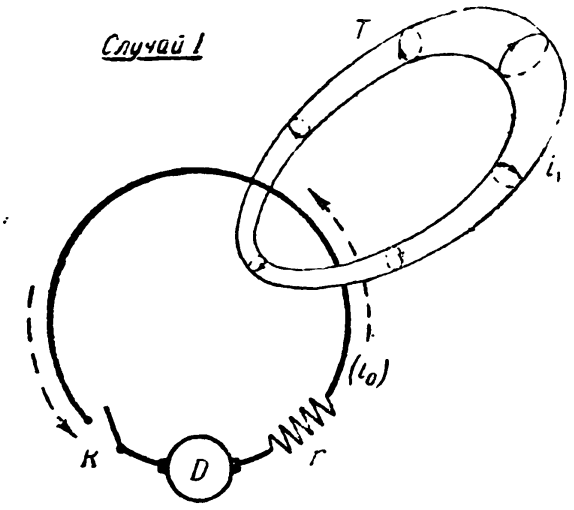


Рис. 148.

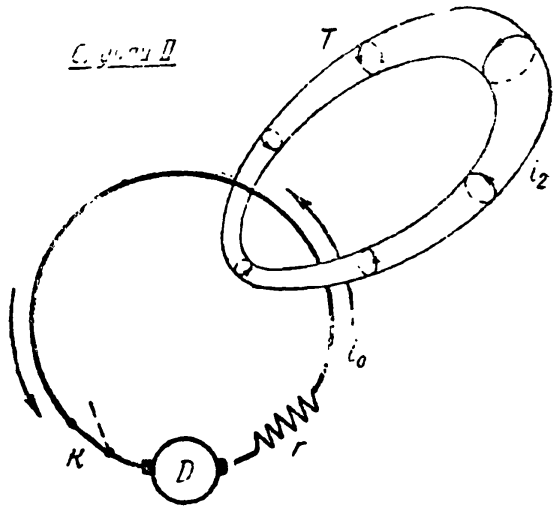


Рис. 149.

Если же, изменив порядок последовательных операций, прежде всего до замыкания рубильника K сообщить телу T свойство сверхпроводимости и только после этого включить ток i_0 (рис. 149), то магнитное поле этого тока распределится по всему пространству вокруг эквивалентного сверхпроводника T, а внутри его объема магнитные линии будут полностью отсутствовать (случай *II*). На поверхности же сверхпроводника возникнет индуктированный ток i_2, по абсолютной величине равный i_0 и i_1, но имеющий направление обратное тому, что было в предыдущем случае *I* (рис. 148), т. е. в случае *II* будем иметь

$$i_2 = -i_0 = -i_1.$$

Наружные магнитные линии, связанные с током i_0 и окружающие эквивалентный сверхпроводник, не претерпят никакого деформирования и в этом отношении всё будет происходить, как если бы тело T вовсе не существовало.

Что в рассмотренном случае *II* наличие тока, индуктированного поверхности сверхпроводника, действительно ни в какой мере не повлияет на нормальное распределение внешних магнитных линий, — это вытекает из следующих соображений. Вернемся сначала к случаю *I* (рис. 148). Ток i_1 охватывает со всех сторон пучок магнитных линий, зафиксированных в объеме эквивалентного сверхпроводника T, и как бы бронирует внешнее пространство от каких бы то ни было магнитных воздействий со стороны указанных линий, образующих поток самоиндукции Φ_s, связанный током i_1. Ничто в этом отношении не изменилось бы, если бы мы с самого начала создали внутри тела T поток Φ_s' такой же по абсолютной величине, но обратный по направлению. Вместе с тем поверхность сверхпроводника обтекалась бы индуктированным током i'_1, имеющим теперь также обратное направление, но опять-таки забронировывающим внешнее пространство от магнитных влияний со стороны потока самоиндукции Φ'_s. Этот ток i'_1 должен быть в точности равным току i_2 (случай *II*, рис. 149) не только в целом, но и для каждого отдельного участка поверхности эквивалентного сверхпроводника T. Дело в том, что, вторично замыкая в случае *I* рубильник K при наличии зафиксированного в сверхпроводнике потока Φ_s, мы возвращаемся, собственно говоря, к исходному состоянию системы, когда никакого индуктированного тока пока еще не было. По существу же, при вторичном замыкании рубильника K, мы наложим на ток i_1 обратный ему ток i_2, который в самостоятельном виде был в случае *II*. Совмещение же этих двух токов i_1 и i_2 мы воспринимаем, как исчезновение всякого тока на поверхности сверхпроводника T. Но, как было выше указано, ток i_1' отличается от тока i_1 только направлением. Отсюда заключаем, что через i_1' и i_2 обозначается один и тот же ток, что все соответствующие элементы токов i_1 и i_2 везде равны по абсолютной величине и обратны по знаку и что ток i_2 не оказывает никаких магнитных влияний на пространство вне тела T.

Такой вывод может быть подтвержден также рассмотрением величины элементов тока на отдельных участках поверхности сверхпроводника T. Эта величина находится в очень простом соотношении с магнитной силой H у самой поверхности. Пусть PQ (рис. 150) будет некоторый участок, выделенный из указанной поверхности и условно развернутый в плоскости чертежа. Здесь l есть какая-нибудь образующая трубчатой поверхности данного эквивалентного сверхпроводника. Вектор магнитной силы H в любой точке поверхности всегда будет направлен вдоль этой образующей. Индуктированный ток, обтекающий трубчатую поверхность, направлен перпендикулярно образующей l. Обозначим через j плотность индуктированного поверхностного тока, т. е. силу тока, отнесенную к единице длины, соответствующей образующей l. Прилагая закон магнитодвижущей силы к бесконечно малому контуру, охватывающему элементарный ток $j\,dl$, легко показать, что

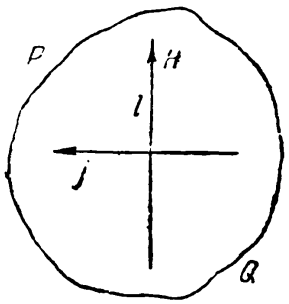


Рис. 150.

$$j = H,$$

т. е. в каждой точке поверхности рассматриваемого сверхпроводника плотность поверхностного тока равна магнитной силе у этой поверхности. Величина же магнитной силы H в некоторой точке, бесконечно близкой

к поверхности PQ, при данных условиях будет одна и та же как в случае *I*, так и в случае *II*. Таким образом, соответствующие элементарные составляющие токов i_1 и i_2 для всех точек поверхности эквивалентного сверхпроводника должны быть равны по абсолютной величине. Выше было отмечено, что токи i_1 и i_1', не сопровождаются какими-либо внешними магнитными действиями в пространстве, окружающем тело T. Следовательно, то же необходимо констатировать и в отношении тока i_2, тождественно равного току i_1'. Поэтому наличие эквивалентного сверхпроводника в случае *II* никоим образом не изменяет нормального распределения магнитного поля вокруг этого тела T, что и требовалось доказать.

г. Остановимся теперь на вопросе о том, в какой мере приложимы к рассмотренным особенным случаям индуктирования тока те три формулировки закона электромагнитной индукции, о которых мы говорили до сих пор (§§ 18 и 36).

И в случае *I* (рис. 148) и в случае *II* (рис. 149) совершенно отсутствуют общие условия, при наличии которых мы могли бы иметь дело с какими-либо пересечениями магнитных линий проводником. Таким образом, первая формулировка (фарадеевская) здесь неприменима.

Далее, в обоих случаях по существу нельзя говорить о фактическом изменении внешнего магнитного потока, сцепляющегося с контуром, в котором индуктируется ток. В случае *I* магнитный поток внутри эквивалентного сверхпроводника T зафиксирован в нем и неизменно жестко связан с ним, всё время пронизывая любое поперечное сечение этого сверхпроводящего тела. Можно, конечно, сказать, что до размыкания рубильника K рассматриваемый поток в геометрическом отношении как бы входит в состав полного магнитного потока, распределенного в пространстве вокруг основного тока i_0. В этом чисто условном смысле магнитный поток Φ_0 внутри эквивалентного сверхпроводника T при наличии тока i_0 можно назвать „внешним" магнитным потоком, т. е. принадлежащим к внешней системе магнитных линий. В действительности же, однако, такое понимание потока Φ_0 совсем неправильно, так как с момента сообщения телу T свойства сверхпроводимости этот поток уже ни в малейшей степени не подчиняется операциям размыкания и замыкания рубильника K и полностью прекращает свою связь с током i_0. С указанного момента поток Φ_0 не должен быть учитываем при определении потока самоиндукции тока i_0. Пока ток i_1 еще не возник, поток Φ_0 не имеет обычных признаков какого-либо потока самоиндукции. Это — какой-то особенный самодовлеющий магнитный поток. Лишь после размыкания тока i_0 зафиксированный поток Φ_0, не претерпевая никаких изменений, теряет геометрический признак „внешнего" магнитного потока и превращается в поток самоиндукции Φ_s, охватываемый индуктированным током i_1. Таким образом, можно только совершенно условно описывать явление, исходя из допущения, что при размыкании цепи основного тока i_0 „внешний" магнитный поток, находящийся в объеме эквивалентного сверхпроводника T, прекращает свое существование в виде именно „внешнего" потока. Со всеми этими оговорками и в качестве весьма искусственного приема мыслимо допустить применение к случаю *I* второй (максвелловской) формулировки закона электромагнитной индукции. Но в случае *II* и этого сделать нельзя. Здесь полностью отсутствует какой бы то ни было магнитный поток, который пронизывал бы поперечное сечение эквивалентного сверхпроводника T. Можно утверждать, что в объеме сверхпроводника совершенно отсутствует в этом случае такого рода магнитный поток (в обычном смысле слова). Он неизменно равен нулю. Следовательно, даже чисто

условно вторая формулировка (максвелловская) не может быть применена к случаю *II*.

Что касается третьей формулировки закона электромагнитной индукции, связанной с представлением об отпочковании магнитных звеньев и нанизывания их на контур проводника, то эта формулировка в такой же степени неприменима ни к случаю *I*, ни к случаю *II*, как и первая формулировка (фарадеевская), простой перефразировкой которой она по сути дела является. Можно было бы, правда, указать, что в случае *I* мы как бы имеем предельные условия отпочкования магнитных звеньев, когда от внешнего магнитного потока не получается никакого остатка.

Итак, в отношении всех трех формулировок закона электромагнитной индукции встречаются некоторые затруднения при применении их к рассмотрению процесса индуктирования тока в особенных случаях *I* и *II* (рис. 148 и 149). Лишь с целым рядом оговорок и условных допущений можно представить себе приложимость второй и третьей формулировок в случае *I*. Но в отношении случая *II* и этого сказать нельзя. Он в полном смысле слова является *особенным случаем*.

д. Как же необходимо рассматривать условия возникновения индуктированного тока в случаях *I* и *II*? Как необходимо понимать процесс индуктирования тока на поверхности эквивалентных сверхпроводников?

В случае *I* так же, как и в случае *II*, существующие в системе магнитные линии не претерпевают никаких деформаций в связи с возникновением индуктированного тока. В обоих случаях, как это уже отмечалось раньше, индуктивный процесс происходит без каких бы то ни было преобразований магнитного потока. Нет никаких нарушений структуры магнитных линий. Те магнитные линии, которые существуют в системе после возбуждения индуктированного тока, сохраняют неизменным общее расположение, бывшее до того.

Общим в обоих случаях является то обстоятельство, что поверхность сверхпроводника оказывается резкой границей распределения магнитных линий в пространстве. В одном случае (рис. 148) поток Φ_0 внутри сверхпроводника *T* ограничен его поверхностью, а снаружи нет никакого магнитного поля. В другом случае (рис. 149) о поверхность сверхпроводника *T* как бы опирается совокупность внешних магнитных линий, не могущих проникнуть внутрь занимаемого им объема, который можно при этом рассматривать в качестве пространства, совершенно запрещенного для магнитных воздействий извне. В обоих случаях при переходе сквозь поверхность сверхпроводника вдоль нормали к данной поверхности мы встречаемся с разрывом непрерывности: по одну сторону от этой поверхности векторы *B* и *H*, касательные к ней, имеют конечное значение, а по другую сторону они внезапно становятся равными нулю. *И всё это в случаях I и II имеет место при совершенной ненарушимости формы магнитных линий, существовавших до процесса индукции и продолжающих существовать внутри или вне эквивалентного сверхпроводника T после индуктирования тока на его поверхности.*

Необходимо еще отметить, что в случае *II* (рис. 149) в значительной степени утрачивают свой обычный смысл представления об электродвижущей силе индукции и о потоке самоиндукции, который нормально охватывается током со всех сторон.

На основании всего сказанного по поводу случаев *I* и *II* (рис. 148 и 149) можно вполне определенно констатировать следующее:

1. *В качестве основной причины возникновения индуктированного тока на поверхности эквивалентного сверхпроводника необходимо считать тесный контакт этой поверхности с магнитным потоком, находящимся только с одной ее стороны.*

2. *На поверхности сверхпроводника, оказывающейся границей распределения магнитного потока в пространстве, возникает индуктированный ток, идущий поперек касающихся этой поверхности магнитных линий.*

3. *Направление каждого отдельного элемента индуктированного в таких условиях тока связывается правилом правого винта (так называемым правилом штопора) с направлением магнитных линий, которые опираются о поверхность сверхпроводника или ограничиваются ею.*

6. Представим себе какое-либо поперечное сечение эквивалентного сверхпроводника T для случаев *I* и *II*.

Рис. 151 соответствует случаю *I* (рис. 148), когда основной ток i_0 уже разомкнут и магнитное поле вокруг эквивалентного сверхпроводника T совершенно отсутствует. Сквозь сечение проходит магнитный поток, который охватывается индуктированным током i_1, обтекающим поверхность сверхпроводника в направлении, показанном стрелками. Указанная поверхность, как неоднократно подчеркивалось, со всех сторон ограничивает магнитный поток, полностью расположенный внутри сверхпроводника. Иными словами, данная поверхность в случае *I* везде находится в непосредственном контакте с внутренним магнитным потоком.

Рис. 152 соответствует случаю *II* (рис. 149), когда основной ток i_0 включается после того, как состояние сверхпроводимости уже успело установиться при отсутствии какого-либо магнитного поля. Магнитный

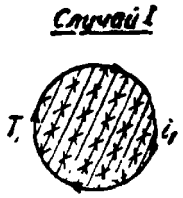


Рис. 151.

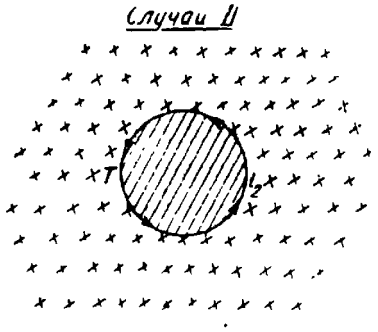


Рис. 152.

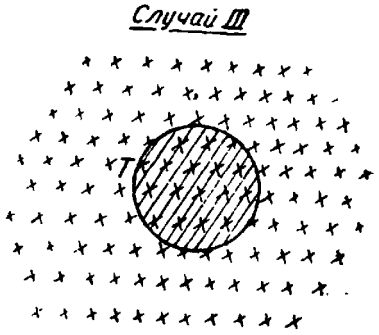


Рис. 153.

поток сквозь данное сечение равен нулю, но взамен этого всё пространство, окружающее эквивалентный сверхпроводник, заполнено потоком самоиндукции основного тока i_0. При одном и том же направлении магнитного потока, вообще принятом для обоих рис. 151 и 152 (например, от нас за плоскость чертежа), направление индуктированного тока i_2 будет обратное представленному на предыдущем рис. 151, т. е. если в случае *I* индуктированный ток i_1 направлен по часовой стрелке, то в случае *II* ток i_2 направлен против часовой стрелки. В последнем случае поверхность сверхпроводника, также ограничивающая область распределения магнитных линий, находится в непосредственном контакте с внешним магнитным потоком.

Для более нагляднего сопоставления случаев *I* и *II* рассмотрим еще случай *III* (рис. 153), представляющий собой как бы совмещение схем, изображенных на рис. 151 и 152. Случай *III* мы можем получить, если в условиях случая *I* (рис. 148 и 151) вновь замкнем цепь тока i_0. При

этом ток на поверхности эквивалентного сверхпроводника T прекратится. Действительно, общую картину магнитного поля, показанную на рис. 153 для случая *III*, мы будем иметь точно такую же и тогда, когда включим основной ток i_0 до сообщения телу T свойства сверхпроводимости и только после этого подвергнем данное тело охлаждению в кипящем гелии. Никакого индуктированного тока еще не будет. Вместе с тем, замыкая ток i_0 уже после того, как был осуществлен случай *I*, мы индуктируем на поверхности эквивалентного сверхпроводника, кроме ранее протекавшего по ней тока i_1, равный ему по абсолютной величине и обратный по направлению ток i_2, в самостоятельном виде возникающий в случае *II*. Результат же наложения двух равных и противоположных токов мы обычно воспринимаем как исчезновение тока.

Таким образом, в случае *III* (рис. 153) мы имеем в потенциальной форме две возможности. *При устранении внешнего магнитного потока* обнаруживается ток, обтекающий поверхность эквивалентного сверхпроводника T в одном направлении (случай *I*), а *при отсутствии внутреннего магнитного потока* обнаруживается на той же поверхности ток другого направления (случай *II*).

Всё происходит так, как будто бы поверхность эквивалентного сверхпроводника T, расположенного в магнитном поле, которое заполняет пространство и снаружи и внутри данного сверхпроводника (случай *III*, рис. 153), уже находится в каком-то особом состоянии, могущем обнаруживаться либо одной, либо другой своей стороной. И это проявляется, когда бывает нарушено нормальное распределение магнитных линий, именно в зависимости от того, в каком направлении изменяется указанное нормальное распределение при переходе сквозь поверхность сверхпроводника. Повидимому, однако, подобная зависимость мыслима только в предположении, что упомянутые две возможности уже, так сказать, заложены в основе процесса, который вообще происходит в магнитном поле самом по себе, вне всякой связи с наличием какого-либо постороннего тела. Роль же эквивалентного сверхпроводника в таких условиях сводится лишь к тому, что он по своим свойствам оказывается способным содействовать расчленению и четкому выявлению каждой из двух возможностей в отдельности. Всё это в высокой степени соответствует общему характеру идеи Фарадея об особом *электротоническом состоянии*, которому и посвящен следующий параграф.

§ 54. Электротоническое состояние

а. Кроме ряда великих открытий, в том научном наследии, которое оставил после себя Фарадей, выдающееся место занимают три тома его „Опытных исследований по электричеству“. Здесь он собрал воедино всё, опубликованное им в связи с изучением области электричества и магнитизма. Включая в себе систематическое и точное описание многочисленных экспериментов, „Опытные исследования“ содержат, сверх того, большое количество общих соображений теоретического характера, имеющих прямое отношение к природе электрических и магнитных явлений и электрического тока, в частности. Настойчиво и упорно работая над вскрытием связи между различными физическими явлениями, Фарадей неоднократно имел повод высказать ряд ценных мыслей, малопомалу подтверждающихся всем дальнейшим развитием науки. Мы хорошо знакомы с его фактическими достижениями, лежащими в основе

широчайшего развития практических приложений электрической энергии. Вообще говоря, хорошо известны и все другие его открытия, уже прочно вошедшие в сокровищницу физических знаний. Однако многое из того, что более или менее отчетливо было осознано Фарадеем и чего он касался, развивая свои теоретические соображения, проникнутые глубокой интуицией, до сих пор еще недостаточно понято и недостаточно отразилось на основных представлениях, с которыми оперирует современная физическая наука. В этом отношении в качестве одного из весьма ярких примеров можно указать на идею Фарадея об *электротоническом состоянии*, которое по его предположениям должно рассматриваться в качестве первопричины всего, наблюдаемого в процессе электромагнитной индукции.

На протяжении свыше 20 лет указанная идея претерпела в физическом мышлении Фарадея значительную эволюцию, так и не завершившуюся полным вскрытием того, как именно надо понимать сущность электротонического состояния. Но во всяком случае высказывания Фарадея по поводу этого особенного состояния могут служить неизменным руководством и направлять мысль всякого исследователя, пытающегося рассматривать вероятную природу явления электромагнитной индукции. Это весьма необходимо иметь в виду теперь, когда открытие сверхпроводимости дало возможность изучать электрический ток в его наиболее чистой форме, не осложненной какими-либо привходящими обстоятельствами второстепенного значения.

Касаясь в своем „Трактате об электричестве и магнитизме" вопроса об электротоническом состоянии, Максвелл, между прочим, указывает: „Вся история этой идеи в мышлении Фарадея, как она обрисовывается в его опубликованных исследованиях, весьма достойна изучения".[1] На следующих страницах мы и сделаем попытку проследить, хотя бы в самых общих чертах, как зародилась идея об электротоническом состоянии и какие последовательные метаморфозы она претерпела в научном творчестве Фарадея.

В своих исследованиях, касавшихся явления электромагнитной индукции, Фарадей уделял большое внимание основным условиям, при которых и благодаря которым это явление возникает.

С первых же шагов в указанном направлении, еще до обнаружения важной роли пересечения проводником „линий магнитной силы" (магнитных линий), он остановился на мысли о том, что проводник, расположенный в магнитном поле и могущий подвергаться индуктивным воздействиям, уже находится в каком-то специфическом состоянии независимо от наличия перемещений данного проводника относительно внешнего магнитного поля. В основном своем мемуаре, датированном ноябрем 1831 г. и являющемся первым описанием открытия электромагнитной индукции („Опытные исследования по электричеству", серия I), Фарадей посвятил указанному вопросу особый раздел, озаглавленный „Новое электрическое состояние или свойство материи" (пп. 60—80). Указанный раздел он начинает словами:

> „60. В то время, когда проволока подвергается вольта-электрической или магнито-электрической индукции, она, повидимому, находится в некотором особенном состоянии".

Далее Фарадей ссылается на главнейшие обстоятельства, которые на первой стадии изучения открытого им явления казались ему доста-

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, § 540.

точными для обоснования предположений о существовании специфического состояния проволоки, отличающего ее от случая обычных условий. Заканчивает он п. 60 так:

„Это электрическое свойство материи не было до сих пор известно, но оно, вероятно, оказывает весьма важное влияние во многих случаях, если не в большинстве явлений, вызываемых токами электричества. По причинам, которые немедленно будут разъяснены (71), я нашел подходящим, после беседы с некоторыми учеными друзьями, назвать его *электротоническим* состоянием".

В п. 71 Фарадей излагает ряд общих соображений по поводу предполагаемого электротонического состояния.

Фарадей снабдил данный раздел своего мемуара специальным примечанием, в котором говорит, что считал себя вынужденным включить в текст мемуара и этот раздел, так как он был предметом доклада в Королевском Обществе и о содержании его уже шла речь в Парижской Академии наук. Но, указывает Фарадей, дальнейшее обследование законов, управляющих явлением электромагнитной индукции, привело его к заключению, что они могут быть полностью разъяснены без допущения электротонического состояния. Он имеет, конечно, в виду истолкование индуктивных действий на базе представления о пересечении проводником „линий магнитной силы" (магнитных линий). Получается впечатление, что Фарадей как бы отказывается от идеи об электротоническом состоянии. И это кажется тем более обоснованным, что описываемые им многочисленные опыты, поставленные с целью обнаружения каких-либо признаков предполагаемого особого состояния тел, помещенных в магнитном поле, не привели к положительным результатам. Необходимо всё же отметить тщательный анализ различных обстоятельств, сопровождающих или могущих совпровождать индуктивные явления, и ряд весьма интересных и смелых высказываний по вопросу об электротоническом состоянии. Между прочим, в начале п. 71 Фарадей говорит:

„Это особенное состояние, повидимому, есть некоторое состояние напряжения, и оно может быть рассматриваемо в качестве *эквивалента* току электричества..."

В этих словах совершенно отчетливо выражена мысль о том, что проводник, внесенный в магнитное поле, уже находится в особенном состоянии, которое при всяком изменении обстановки может проявиться в индуктировании тока. Но пока общие условия остаются постоянными, возможность возникновения в проводнике индуктивных эффектов остается скрытой в потенциальном виде.

Где же скрыта такая возможность? Что является носителем электротонического состояния — этого *эквивалента току электричества*? На первом этапе развития мысли Фарадея в указанном направлении речь шла главным образом о веществе металлического проводника, хотя как бы мимоходом и высказывается предположение, что электротоническое состояние может быть свойственно даже непроводникам (диэлектрикам), находящимся в магнитном поле (п. 73). Как мы увидим, в дальнейшем он определенно приходит к осознанию тесной связи электротонического состояния с самой природой „линий магнитной силы" (магнитных линий). Таким образом, основным носителем этого состояния он в конце концов считает именно магнитное поле.

В следующем своем мемуаре, датированном январем 1832 г. („Опытные исследования по электричеству", серия II), Фарадей уже говорит о пересечениях магнитных линий проводником как о главном факторе

в процессе электромагнитной индукции и вновь указывает на отсутствие поводов к допущению электротонического состояния (п. 231). Однако некоторые колебания в этом отношении можно усмотреть в следующих словах Фарадея:

„242. Таким образом, причины, побудившие меня сделать предположение об особенном состоянии проволоки (60), отпадают; и хотя мне продолжает казаться неправдоподобным, чтобы проволока, находящаяся в покое, по соседству с другой проволокой, по которой течет сильный электрический ток, была совершенно безразлична в отношении этого обстоятельства, всё же я не осведомлен о каких-либо определенных *фактах*, дающих основание для заключения, что эта первая проволока находится в некотором особенном состоянии".

В серии IX „Опытных исследований по электричеству", посвященной рассмотрению явлений самоиндукции и вообще индуктивных действий электрического тока (декабрь 1834 г.), Фарадей снова возвращается к идее об электротоническом состоянии, хотя и весьма нерешительно (п. 1114). Опять вполне отдавая себе отчет в том, что пока еще не хватает достаточно определенных данных, чтобы мотивировать представление о подобном особенном состоянии, он всё же не может воздержаться от констатирования общего впечатления, говорящего в пользу существования этого состояния. Как бы в свое оправдание он прямо указывает: „I cannot resist the impression that there is some connected and correspondent effect". (Я не могу сопротивляться впечатлению, что существует какой-то связанный и соответствующий эффект). Как это вытекает из контекста, речь идет о промежуточном состоянии системы электрических цепей за время от замыкания до размыкания тока в одной из них, причем Фарадей ссылается на пп. 60 и 242 своих предыдущих работ.

В феврале 1838 г. Фарадей представил в Королевское Общество доклад (см. серию XIII „Опытных исследований по электричеству"), посвященный главным образом рассмотрению различных видов электрического разряда в газах. Последний раздел этой работы озаглавлен „Nature of the electric current" („Природа электрического тока"). Здесь, основываясь на известных ему опытных данных, он сопоставляет и анализирует всевозможные формы и проявления электрического тока. Он останавливается на токе обычной проводимости, на токе конвекции, на разрывном разряде, на электролитических действиях, на тепловом эффекте и в последних пунктах этого раздела, касаясь электромагнитной стороны процесса электрического тока, вновь возвращается к идее об электротоническом состоянии. Следует при этом отметить некоторый шаг вперед и своего рода эволюцию в представлениях Фарадея. Раньше он в основном предполагал наличие этого состояния в обычных металлических проводниках, находящихся в условиях, которые могут проявляться в индуктивных действиях, и только вскользь высказывал мысль (п. 73) о возможности отнесения и непроводников к разряду тел, способных приобретать указанное особенное состояние. Теперь он более решительно допускает, что и диэлектрики, находящиеся в тех же условиях, могут приобретать электротоническое состояние. В этом отношении представляют интерес пп. 1660 и 1661:

„1660. Явление индукции между токами, которое мне посчастливилось открыть несколько лет тому назад (6 и т. д., 1048), быть может, представляет собою некоторое связующее звено в группе эффектов. Когда ток сначала возникает, он стремится возбудить ток противоположного направления во всей окружающей материи; и если эта материя обладает свойством проводимости, то при над-

лежащих условиях в ней подобный ток и возбуждается. Обратно, когда основной ток прекращается, везде кругом стремится образоваться ток того же направления, и он возбуждается в случае наличия проводящей материи, соответствующим образом расположенной.

1661. Теперь, хотя мы замечаем эти эффекты в той части материи, которая, находясь по соседству, обладает свойствами проводимости, однако гипотетически можно считать вероятным, что непроводящая материя также связана с причиной возбуждения некоторой зависимостью и также испытывает ее воздействие, хотя мы еще не открыли этого. Опять и опять соотношение между проводниками и непроводниками вырисовывается не как различие качественного характера, но только как различие в степени (1334, 1603); и поэтому, на основании указанных, а также других соображений, представляется вероятным, что обстоятельства, оказывающие воздействие на проводник, будут воздействовать и на изолятор; причем быть может, возникает то, что охватывается термином — электротоническое состояние (60, 242, 1114)".

Здесь следует особо отметить предположение Фарадея о том, что и диэлектрики способны испытывать эффект электромагнитной индукции. Именно эта весьма плодотворная идея дала возможность Максвеллу сделать широкое обобщение закона электромагнитной индукции и привела его к электромагнитной теории света.

В июне 1838 г. в докладе, посвященном природе электрических сил и соотношению между электрическими и магнитными силами (серия XIV „Опытных исследований по электричеству"), Фарадей, развивая свои мысли относительно участия промежуточной среды в передаче магнитных влияний, говорит следующее:

„1729. Мне представляется возможным поэтому и даже вероятным, что магнитное действие может быть сообщаемо на расстоянии через посредство действия промежуточных частиц, которое осуществляется способом, имеющим некоторую связь с тем, как индуктивные силы статического электричества передаются на расстоянии (1677); при этом промежуточные частицы на известное время оказываются в большей или меньшей степени в особенных условиях, которые я неоднократно (хотя и в форме весьма несовершенной идеи) характеризовал при помощи термина — *электротоническое* состояние (60, 242, 1114, 1661)".

Обращает на себя внимание открытое признание Фарадея, что идея об электротоническом состоянии выражалась им пока еще в форме, которая самого его, видимо, не очень удовлетворяла.

В том же докладе Фарадей трактует очень важный вопрос о связи между статическим электрическим полем и магнитным полем. Он не допускает мысли об отсутствии подобной связи. Все электромагнитные процессы свидетельствуют о существовании каких-то соотношений между электричеством и магнитизмом вообще. В предполагаемом электротоническом состоянии он и склонен видеть связующее звено между указанными двумя категориями явлений. Решению вопроса о характере этой связи Фарадей придает большое значение:

„1732. Решить данный вопрос о тождественности или различии двух родов сил и установить их истинное соотношение, — было бы чрезвычайно важно. Вопрос этот представляется лежащим полностью в пределах возможностей экспериментального обследования, и сулит высокое вознаграждение тому, кто попытается его разрешить.

1733. Я уже выражал надежду на обнаружение эффекта или обстоятельства, находящегося в таком же отношении к статическому электричеству, как магнитная сила — к текущему электричеству (1658). Если бы я был в состоянии доказать, к большому моему удовлетворению, что магнитные силы распространяют свое влияние на расстоянии при посредстве соединенного действия промежуточных частиц способом, аналогичным тому, как это происходит с электрическими силами, в таком случае я должен был бы заключить, что боковое напряжение линий индуктивного действия (1659) или что то состояние, на которое я столь часто ссылался как на электротоническое состояние (1661, 1662), и представляет собой это вышеуказанное обстоятельство, имеющее отношение к статическому электричеству".

Таким образом, по мнению Фарадея, вскрытие сущности электротонического состояния может пролить свет и на вопрос о природе „статического электричества".

Далее следует значительный перерыв в высказываниях Фарадея по поводу электротонического состояния. Он возвращается к нему лишь в 1851 и 1852 гг. в работах, в которых он пересматривает и значительно дополняет фактический материал, относящийся к области учения о „физических линиях магнитной силы", т. е., выражаясь современным языком, к области учения о магнитном потоке как о физической реальности.

В работе, датированной октябрем 1851 г. („Опытные исследования по электричеству", серия XXVIII), после рассмотрения ряда вопросов, касающихся общих условий, в которых протекает явление электромагнитной индукции, Фарадей говорит, между прочим:

„3172. Все описанные результаты были получены *с движущимися металлами*. Но одно движение само по себе не могло бы породить соотношений, которые не имели основания в некотором предварительно существовавшем состоянии; и, следовательно, *покоящиеся* металлы должны находиться в каком-то соотношении с активным центром сил...

3173. Если наличие подобных условий будет в дальнейшем удостоверено экспериментом и идея электротонического состояния (60, 242, 1114, 1661, 1729) оживет и будет подтверждена, тогда тела, подобные воде, маслу, смолам и т. д., будут, вероятно, отнесены к категории тел, могущих приобретать это же состояние..."

В приведенных цитатах следует прежде всего отметить большую четкость, с которою Фарадей мотивирует необходимость допустить наличие особенного *предварительного* состояния металлов, подвергающихся затем индуктивным воздействиям (п. 3172). В немногих словах здесь он выражает всё то, что с известной долей нерешительности и не столь определенно высказывалось им в ряде прежних работ, когда шла речь о предполагаемом электротоническом состоянии. Далее, в п. 3173 он вновь подчеркивает, что рассматриваемое особенное состояние материи, если оно действительно существует, должно быть свойственно не только металлам, но и диэлектрикам, находящимся в магнитном поле.

Наконец, в последней своей большой работе „On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" (О физическом характере линий магнитной силы, „Опытные исследования по электричеству", том III, стр. 407—437, июнь 1852 г.) Фарадей высказывает много весьма важных суждений о природе магнитных линий и снова очень настойчиво выдви-

гает идею об электротоническом состоянии, которая теперь приобрела несколько более законченную форму, чем это было раньше. Так, он говорит:

„3269. Взаимное соотношение магнитных силовых линий и электрической оси активности [т. е. электрического тока][1] стало известным еще со времен Эрстеда и Ампера. Это, при наличии тех соображений, которые я стремился развить, позволяет нам высказать догадку или суждение, с некоторой определенной степенью вероятности, касательно природы линий магнитной силы. Я склоняюсь к мысли, что они физически существуют соответственно их аналогу, электрическим линиям; и принимая это во внимание, я далее ставлю вопрос, вероятно ли предположение, что они [магнитные линии] характеризуются динамическими условиями аналогично тому, что имеет место в отношении электрической оси [т. е. электрического тока], с которой они столь тесно и, быть может, неизбежно связаны, причем в данном случае возникала бы идея о магнитных токах [т. е. о некотором кинетическом процессе, ассоциируемом с принципиально замкнутыми контурами]; или они образованы некоторым состоянием напряжения (эфира?) вокруг электрической оси и могут быть рассматриваемы поэтому как статические по своей природе. Снова и снова меня преследует идея об *электротоническом* состоянии (60, 1114, 1661, 1729, 1733); такое состояние совпадало бы и было бы тождественно с тем, что образует физические линии магнитной силы. Другое соображение связано с тем же направлением мыслей. Я раньше отмечал, что магнитный эквивалент *статического* электричества неизвестен; действительно, если скрытое состояние электрической силы соответствует столь же скрытым условиям, определяющим магнитную силу, и если электрический ток или ось электрической активности соответствует линиям магнитной силы или осям магнитной активности, то в этом отношении ничего не известно о магнитных условиях, которые соответствовали бы статическому состоянию электрических сил (1734). Затем, если мы признаем, что физические линии магнитной силы являются токами [т. е. каким-то движением, ассоциируемым с принципиально замкнутыми контурами], то весьма неправдоподобно, чтобы подобное связующее звено отсутствовало в природе; более неправдоподобно, я полагаю, чем предположение, что магнитные условия должны зависеть от какого-то состояния напряжения; и это тем более неправдоподобно, что при последнем предположении физическое существование линий магнитной силы было бы столь же достоверно, как и в случае предыдущего предположения [о кинетической природе магнитных линий]; свойство же искривленности этих линий, признать которое, как мне кажется, столь необходимо в соответствии с действительными фактами, оказывалось бы [лишь] чем-то возможным".

В только что цитированном п. 3269, как в своего рода фокусе, сконцентрированы и весьма лаконично, но ярко выражены основные соображения Фарадея по вопросу о природе магнитных линий и электрического тока. Общие условия, в которых протекает явление электромагнитной индукции, еще со времени его открытия непрерывно и неуклонно занимали мышление Фарадея. Проникновенный анализ всех обстоятельств, сопровождающих это явление, внушил ему в конце концов идею о том, что в самом магнитном поле имеют место некоторые условия, в скрытом

[1] В квадратные скобки заключены пояснения к переводу.

виде таящие в себе сущность процесса электромагнитной индукции и стоящие в непосредственной связи с природой электрического тока. Таким образом, в представлениях Фарадея „физические линии магнитной силы" (магнитные линии) оказываются носителями каких-то скрытых свойств, имеющих прямое отношение к электрической стороне электромагнитных явлений. В этом, надо полагать, и заключается причина той настойчивости, с которою он проводит идею особенного состояния среды в магнитном поле. В этом же надо видеть и смысл введенного им термина „*электротоническое состояние*".

По поводу всего содержания п. 3269 в целом можно конкретно сказать следующее:

1. *Здесь Фарадей полностью подтверждает неоднократно высказывавшееся им мнение о том, что магнитные линии („физические линии магнитной силы") реально существуют.*

2. *Он ставит на первое место вопрос о природе магнитных линий.*

3. *Он считает наиболее правдоподобным предположение о динамической природе магнитных линий, т. е. о том, что они представляют собой некоторую специфическую форму движения материи.*

4. *Фарадей более решительно, чем это было прежде, выдвигает идею об электротоническом состоянии,* причем идея эта уже сильно эволюционировала. Раньше он относил указанное состояние к обычной материи — металлам и диэлектрикам, находящимся в магнитном поле. Теперь же, как это совершенно ясно вытекает из всего контекста, он говорит об электротоническом состоянии как о свойстве самого магнитного поля, самих магнитных линий, вне зависимости от наличия обычной материи в пространстве, где распределены магнитные линии. Таким образом, можно определенно констатировать, что *в последней стадии развития идеи об электротоническом состоянии Фарадей ассоциирует его непосредственно с магнитными линиями, как таковыми.*

5. Он отчетливо высказывает мысль, что *именно электротоническое состояние, быть может, составляет сущность физической реальности, называемой магнитной линией.*

6. Фарадей ставит очень важный вопрос о существовании *магнитного эквивалента статического электричества,* иными словами, вопрос о характере соотношения между магнитным потоком и тем, что мы воспринимаем в качестве электрического заряда. Он отмечает, что в его время подобного рода „магнитный эквивалент статического электричества" не был известен. По этому поводу следует указать, что и в настоящее время не получил своего разрешения этот поставленный еще Фарадеем вопрос о природе „статического электричества", по существу сводящийся к вопросу об отношении структуры элементарного электрического заряда к элементарному магнитному потоку. Тут уместно будет напомнить, что в лабораторном дневнике Фарадея за 1822 г. есть запись: „Обратить магнитизм в электричество". Можно полагать, что заключающуюся в этих словах директиву он считал лишь частично выполненной открытием электромагнитной индукции тока. В этом именно смысле и надо понимать слова Фарадея: „Другое соображение связано с тем же направлением мыслей", непосредственно следующие в п. 3269 за его высказываниями по поводу электротонического состояния. В идее об этом особенном состоянии он, по всей вероятности, видел ключ к разрешению поставленного им весьма существенного вопроса о „магнитном эквиваленте статического электричества".

§ 55. Электротоническое состояние как основное свойство магнитного потока

а. При рассмотрении явлений электромагнитной индукции Максвелл касается идеи Фарадея об электротоническом состоянии и выражает мнение, что эта идея в математическом отношении эквивалентна представлению о количестве магнитных линий, охватываемых контуром некоторой цепи.[1] Максвелл подтверждает большую плодотворность фарадеевского метода изучения индуктивных процессов, базирующегося на учете пересечения магнитных линий проводником цепи. Как он указывает, Фарадей во второй стадии своих работ на эту тему оставил в стороне идею об электротоническом состоянии именно потому, что путем оперирования с магнитными линиями и с их пересечениями проводником оказалось возможным дать весьма простое и наглядное разъяснение общих условий, при наличии которых протекает явление электромагнитной индукции. Принимая всё это во внимание, Максвелл в дальнейшем не возвращается к вопросу об электротоническом состоянии.

Необходимо, однако, иметь в виду следующее. Как показывает приведенный выше (§ 54) краткий обзор всех высказываний Фарадея по поводу электротонического состояния (с 1831 по 1852 г.), в его мышлении представление об этом особенном состоянии охватывало собой нечто большее, чем одно лишь разъяснение самого процесса электромагнитной индукции тока. Не подлежит сомнению, что Фарадеем по существу руководило стремление наметить путь к разрешению вопроса о природе „линий магнитной силы“ (магнитных линий — элементарных составляющих магнитного потока). Об этом особенно ярко свидетельствует последнее высказывание Фарадея об электротоническом состоянии (см. п. 3269 цитированный в предыдущем § 54). К тому же стремился и Максвелл, когда подвергал анализу магнитное вращение плоскости поляризации, открытое Фарадеем.[2] Вступительный параграф главы своего „Трактата“, посвященной указанному вопросу, он как-раз заканчивает словами:

> „Мы примем открытие Фарадея в качестве нашего исходного пункта для дальнейшего исследования, направленного к вскрытию природы магнитизма, и потому опишем явление, которое он наблюдал“.

Как известно, анализируя „Магнитное действие на свет“, Максвелл, в полном согласии с предшествовавшими высказываниями по тому же поводу со стороны В. Томсона (Кельвина), пришел к заключению, что в магнитном поле мы встречаемся с вращательным движением материальной среды. При этом он высказывает мнение, что здесь речь должна итти не о вращательном движении значительных объемных участков среды в целом, а о вращении ряда элементарных порций материи вокруг их общей оси.[3] Всё это сближает максвелловские магнитные вихри с гельмгольцевскими вихревыми нитями в жидкости, лишенной внутреннего трения (см. § 5 главы I). Такого рода жидкость мы не можем мыслить в реальных условиях иначе, как эфир. Максвелл ссылается на соответствующие работы В. Томсона (Кельвина) и Гельмгольца, а также на ряд своих статей, посвященных вращательному движению материи в магнитном поле.[4]

---

[1] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, §§ 540 и 541.

[2] Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, Chapter XXI — „Magnetic Action on Light“ (§§ 806—831).

[3] См. раздел — „On the Hypothesis of Molecular Vortices“ главы XXI максвелловского „Трактата“ (§§ 822—831).

[4] Philosophycal Magazine. March, April and May 1861. January and February 1862.

Мы знаем (§ 54), что сам Фарадей не шел так далеко в своих соображениях, касавшихся природы магнитного поля. Он ограничился общим указанием на правдоподобность предположения, что в „физических линиях магнитной силы" (магнитных линиях) мы имеем дело с некоторой формой движения, имеющего тесную связь с тем движением электрического характера, которое принято называть электрическим током и которое при примитивном понимании этого процесса описывается как простое перемещение электрических зарядов.

Основываясь на всём том, что было уже сказано в настоящей книге по вопросу о природе магнитного потока (см. Главу I, §§ 3—5, Главу IV, § 30), и считая наиболее вероятным, что соображения Максвелла по этому поводу имеют непосредственное отношение к реальным процессам, происходящим в магнитном поле, мы в дальнейшем, касаясь значения идеи Фарадея об электротоническом состоянии, будем исходить из предположения, что каждая элементарная магнитная линия действительно является вихревой нитью в эфире. Мы будем считать равнозначными термины *„магнитная линия"* и *„магнитный вихрь"*.

б. Вернемся теперь к рассмотрению эквивалентных сверхпроводников (§ 53, рис. 148, 149, 151—153).

В настоящее время мы еще не располагаем достаточными данными для того, чтобы вполне достоверно решить вопрос о направлении реального вихревого движения, которое должно быть ассоциируемо с магнитными линиями. Весьма вероятно, что оно совпадает с направлением течения отрицательного электричества в так называемой намагничивающей катушке. Однако ради удобства будем условно считать, что направление вихревого движения совпадает с направлением, номинально принимаемым за положительное в процессе электрического тока, т. е. допустим, что правило правого винта (правило штопора) имеет отношение к вихревым движениям, свойственным всякому магнитному потоку.

При указанном допущении, в случае *I* (рис. 151 направление тока i_1, обтекающего поверхность эквивалентного сверхпроводника T, будем считать полностью согласованным с вихревым движением в магнитных линиях, охватываемых рассматриваемой трубчатой поверхностью. В данных условиях это будет движение по часовой стрелке. Если магнитных вихрей в объеме эквивалентного сверхпроводника нет, а его трубчатая поверхность ограничивает внешний магнитный поток того же направления, что и внутренний магнитный поток в случае *I*, то получается случай *II* (рис. 152), когда индуктированный ток i_2 направлен против часовой стрелки.[1] Таким образом, на границе двух групп магнитных вихрей (внутренних и внешних), что мы имеем в случае *III* (рис. 153), не будет обнаруживаться никакого „индуктированного" тока: противоположно направленные токи i_1 и i_2 как бы накладываются один на другой и компенсируют друг друга во всех своих внешних проявлениях.

В случаях *I*, *II* и *III* (рис. 151, 152 и 153) роль эквивалентного сверхпроводника T, надлежащим образом расположенного, сводилась в основном к тому, что он был способен замещать любую трубку магнитной индукции, которую можно мысленно выделить из всего магнитного потока, связанного с некоторым током i_0, протекающим по какой-либо обычной цепи (рис. 148 и 149). При этом нисколько не нарушалось нормальное распределение магнитных вихрей в поле тока i_0. Вместе

[1] Но этот же ток i_2 оказывается направленным по часовой стрелке, если мы рассматриваем его отдельные элементы по отношению к внешним магнитным вихрям, прилегающим к эквивалентному сверхпроводнику T.

с тем эквивалентный сверхпроводник давал возможность вскрывать и, так сказать, обнажать то, что происходит на трубчатой поверхности, ограничивающей некоторый магнитный поток, т. е. совокупность магнитных вихрей (магнитных линий). Это и проявлялось в форме „индуктированного" тока i_1 (случай *I*) или i_2 (случай *II*), обтекавшего поверхность эквивалентного сверхпроводника, когда она оказывалась границей распределения магнитного поля (рис. 151 и 152).

Мы уже указывали в конце § 53, что всё это заставляет предположить наличие в магнитном поле, самом по себе, особенного состояния или особенных условий, в скрытом виде таящих в себе две возможности: случай *I* и случай *II*. Подобного рода предположение полностью соответствует существу мыслей Фарадея о том, что индуктирование тока должно обусловливаться *предварительным* существованием в данной системе специфического состояния, которое он и назвал электротоническим. Мы видели далее, что в конце концов Фарадей мыслил электротоническое состояние как свойство, присущее самому магнитному потоку (см. п. 3269 в предыдущем § 54).

Максвелловское представление о магнитных вихрях позволяет высказать некоторые соображения в развитие идеи об электротоническом состоянии. Действительно, вихревое движение, происходящее в любой трубке магнитной индукции, включает в себе пространственные перемещения соответствующей физической реальности (эфира) в направлениях, поперечных оси трубки. На поверхности трубки магнитной индукции указанные элементарные перемещения, будучи согласованными в своих направлениях, в целом образуют своего рода обтекание данной трубчатой поверхности подобно тому, что мы имели при обтекании поверхности эквивалентного сверхпроводника током i_1 (случай *I*, рис. 148 и 151) или током i_2 (случай *II*, рис. 149 и 152).

Если сделать еще один шаг дальше в смысле сближения тех процессов, которые происходят на поверхности некоторой трубки магнитной индукции и на поверхности эквивалентного сверхпроводника, могущего замещать эту трубку, то остается только допустить, что по существу оба указанных процесса представляют собой как бы одно и то же. В качестве возможного различия, не имеющего, впрочем, особо важного значения, необходимо указать на известную вероятность того, что на поверхности эквивалентного сверхпроводника в большей или меньшей степени происходит увлечение элементарных электрических зарядов со стороны магнитных вихрей. Быть может, однако, такого рода увлечение начинается только тогда, когда магнитная сила поля превосходит критическое значение и в связи с этим свойство сверхпроводимости нарушается или же когда данное свойство исчезает под влиянием изменения чисто внешних обстоятельств, обусловливавших надлежащую низкую температуру проводника. Во всяком случае всё это не играет основной роли. Суть же дела в том, что выдвигается *гипотеза о принципиальной тождественности процессов, происходящих на поверхности эквивалентного сверхпроводника и на той же (в геометрическом смысле) поверхности, когда она просто ограничивает соответствующую совокупность магнитных линий независимо от наличия посторонних тел в магнитном поле.*

Если всё сказанное имеет отношение к рассматриваемым явлениям, то необходимо притти к заключению, что каждый элементарный магнитный вихрь (магнитная линия) и каждая совокупность подобных вихрей, т. е. любая трубка магнитной индукции вообще, по своей природе включают в себе процесс, которому мы должны приписать электри-

ческий характер в такой же степени, как и токам i_1, i_2, индуктируемым в надлежащих условиях на поверхности эквивалентного сверхпроводника (случаи *I* и *II*, рис. 151 и 152). Тогда до известной степени выясняется смысл термина „*электротоническое состояние*", которым Фарадей, повидимому, хотел подчеркнуть, что в каждой точке магнитного поля мы уже встречаемся в скрытом виде с какими-то условиями, непосредственно относящимися к *электрическим* явлениям и могущим вскрываться в форме индуктированного *электрического* тока. Это именно обстоятельство было отмечено нами и раньше (§ 53).

С развиваемой точки зрения представляет интерес сопоставление двух высказываний Фарадея по поводу электротонического состояния, приведенных выше в предыдущем § 54:

1. „Это особенное состояние ... может быть рассматриваемо как *эквивалент* току электричества ... (п. 71).
2. Снова и снова неотступно меня преследует идея об *электротоническом* состоянии (60, 1114, 1661, 1729, 1733); такое состояние совпадало бы и было бы тождественно с тем, что образует физические линии магнитной силы ..." (п. 3269).

Итак, принимая во внимание всю совокупность высказываний Фарадея об электротоническом состоянии, а также придерживаясь установок Максвелла по вопросу о природе магнитного поля, мы можем считать весьма правдоподобным следующее определение этого особенного состояния:

Электротоническое состояние есть основное свойство всякого магнитного потока, присущее ему в связи с тем, что элементарные трубки магнитной индукции (магнитные линии) представляют собой вихревые нити в эфире, причем это вихревое движение эквивалентно электрическим токам, обтекающим ось каждой подобной трубки в пределах всего ее объема.

в. При таком расширенном толковании понятия об электрическом токе может возникнуть вопрос от том, не следует ли в случае применения закона магнитодвижущей силы учитывать также и процессы, происходящие в объеме каждого отдельного магнитного вихря и эквивалентные электрическим токам. Необходимо, однако, принять во внимание, что эти процессы, имеющие характер каких-то чисто *внутренних* элементарных токов, с рассматриваемой точки зрения составляют органически неотъемлемую часть строения магнитных вихрей (магнитных линий) и не могут быть мыслимы обособленно от магнитных вихрей. Совокупность же этих магнитных вихрей, будучи распределенной по всему пространству, занятому магнитным полем, представляет собой основной источник тех свойств, которыми обладает данное поле. Магнитная сила H есть лишь одно из проявлений магнитных вихрей. Оперируя с магнитной силой, мы уже учитываем то, что происходит в самих магнитных вихрях. Вследствие этого нет никаких причин к тому, чтобы предположение о существовании элементарных вихревых токов или некоторого их эквивалента влекло за собой необходимость какого-либо изменения обычной формулировки закона магнитодвижущей силы. Здесь под полным электрическим током, сцепляющимся с контуром интегрирования, нормально принято подразумевать сумму токов, *внешних* по отношению к каждой магнитной линии рассматриваемого поля.

г. В заключение настоящего § 55 считаем целесообразным, в виде дополнения к сказанному выше и отчасти в виде повторения, дать еще несколько пояснений по поводу значения фарадеевской идеи об электротоническом состоянии.

Прежде всего коснемся процесса электромагнитной индукции тока. С точки зрения, учитывающей существование этого особенного состояния, индуктивный процесс можно рассматривать не как возникновение какого-то по существу нового явления, а как известное обнаружение того, что в скрытом виде уже происходит в каждой элементарной составляющей магнитного потока и что следует понимать именно как электротоническое состояние, свойственное всякому магнитному потоку. При нормальном распределении магнитного потока, когда система составляющих его магнитных линий (магнитных вихрей) находится в некотором равновесии, скрытые движения, имеющие характер вихревых токов в пространстве, взаимно компенсируются в отношении внешних проявлений, и мы их не воспринимаем в качестве ясно выраженных электрических токов. Но при всяком нарушении нормального распределения магнитного потока нарушается и взаимное уравновешивание элементарных вихревых токов в магнитном поле. Это сопровождается преимущественным выявлением одного из двух противоположных направлений „электрического" движения на границе раздела областей пространства с различным распределением магнитных линий, т. е. более или менее резко различающихся в смысле интенсивности электротонического состояния. Указанное обстоятельство, как мы видели, весьма отчетливо обнаруживается на поверхности сверхпроводников вследствие их особенных свойств в отношении магнитного потока (случаи *I* и *II*, рис. 151 и 152). Есть полное основание предполагать, что подобное же нарушение нормального распределения магнитного потока, хотя и не могущее развиться до предела, наблюдаемого только в случае сверхпроводников, представляет собой истинную причину индуктирования электрического тока и во всех вообще случаях, когда имеет место относительное перемещение обычных проводников и магнитного потока. Повидимому, и здесь суть дела в согласованном выявлении какого-либо одного (в зависимости от обстановки) направления уже существующих в магнитном поле вихревых токов, по самой природе вещей входящих в состав структуры элементарных трубок магнитной индукции (магнитных линий). И такое „индуктирование" тока в обычной проводящей цепи всегда осложняется возникновением движения электронов, ионов и всяких иных мыслимых в настоящее время элементарных носителей электрического заряда. Вместе с тем необходимо также иметь в виду и важную роль электрического смещения в процессе всякого электрического тока (см. § 63).

Далее скажем еще несколько слов касательно связи электричества и магнитизма. Речь идет не о математических соотношениях, характеризующих эту связь и прочно установленных благодаря трудам многих крупнейших ученых, которые теоретически и экспериментально изучали область электромагнитизма со времен открытия Эрстедом основного электромагнитного явления (1820 г.). Можно без всякого преувеличения сказать, что математическая теория электромагнитного поля представляет собою одно из наиболее блестящих достижений науки. Однако до сих пор остается открытым вопрос о самой природе связи электрического и магнитного полей, входящих во всякое электромагнитное поле как его составные части. Необходимо признать, что в этом отношении до сих пор существуют лишь кое-какие намеки и предположения, но чего-либо более или менее строго установленного и общепризнанного еще нет. Мы, например, совершенно не осведомлены, как именно протекает процесс преобразования энергии магнитного потока в энергию электрического поля и обратно (см. §§ 65 и 66). Между тем, такого рода преобразования мы должны констатировать во многих электромагнитных

процессах и, вообще говоря, в совершенстве владеем математическим аппаратом, описывающим внешнюю сторону этих преобразований. Сущность же того, что при этом происходит, пока еще не известна. Надо полагать, что именно фарадеевская идея об электротоническом состоянии может послужить некоторым руководством при разрешении естественно возникающей общей проблемы о природе магнитного и электрического полей и об истинном характере их соотношения.

Наконец, необходимо еще раз отметить, что до сих пор мы практически ничего не знаем, в какой зависимости находятся между собой структура элементарной составляющей магнитного потока (элементарной трубки магнитной индукции, т. е. реально существующей магнитной линии) и структура элементарного электрического заряда. Так как вся область электромагнитизма неопровержимо свидетельствует о теснейшей связи электрических и магнитных явлений и об их постоянных взаимодействиях, то отсюда должно вытекать, что есть нечто общее и единое в структуре электрического заряда и магнитного потока (см. §§ 59—61). Если бы эти физические реальности, обычно кажущиеся нам обособленными и иногда даже противополагаемые, действительно не имели ничего общего, то никакое их взаимное влияние не было бы в состоянии как-либо осуществляться. Только соображениями такого порядка можно объяснить то обстоятельство, что Фарадей в свое время ставил *вопрос о магнитном эквиваленте статического электричества.* И не случайно, конечно, Фарадей связывал этот вопрос именно с представлением об электротоническом состоянии (см. приведенный в § 54 п. 3269 из „Опытных исследований по электричеству").

§ 56. Параллельное соединение сверхпроводящих цепей

Ознакомление с явлениями сверхпроводимости (§§ 50—53) логически привело нас к рассмотрению фарадеевской идеи об электротоническом состоянии. В связи с этим мы сделали попытку несколько углубиться в подлинное содержание указанной идеи, лишь в общих чертах охарактеризованной самим Фарадеем. Мы исходили из того обстоятельства, что изучение сверхпроводимости вполне определенно свидетельствует о весьма важной роли потока самоиндукции в процессе всякого электрического тока. Продолжим теперь обследование с этой точки зрения еще некоторых случаев электрического тока в сверхпроводящих цепях.

Совершенно своеобразный и в значительной степени необычайный характер электрокинетического процесса, называемого „электрическим током", мы имеем и в случаях параллельного соединения сверхпроводящих ветвей. Представим себе, например, две сверхпроводящие ветви (рис. 154), включенные параллельно в какую-либо внешнюю цепь между точками A и B. Допустим, что коэффициенты самоиндукции этих ветвей будут соответственно L_1 и L_2. Сначала в рассматриваемой цепи в целом и в параллельных ветвях, в частности, нет никакого тока. Затем замыканием некоторого рубильника во внешней цепи установим в неразветвленной части ее ток, сила которого равна i_0. Спрашивается: как этот ток i_0 разделится между двумя параллельными сверхпроводящими ветвями? Мы хорошо знаем решение этого вопроса для случая ветвей с сопротивлением, не равным нулю. *При наличии же сверхпроводящих ветвей мы не будем в состоянии разрешить задачу о разветвлении тока иначе, как путем прямого или косвенного оперирования с магнитным потоком самоиндукции.* Проще

всего можно рассуждать следующим образом. Полный магнитный поток, сцепляющийся с контуром, который состоит из рассматриваемых двух сверхпроводящих ветвей, вначале был равен нулю. Этот поток и в дальнейшем должен сохранять то же значение, т. е. всегда и неизменно мы будем иметь

$$\Phi_s = L_1 i_1 - L_2 i_2 = 0,$$

какие бы токи в ветвях ни установились в связи с разветвлением тока i_0. Знак минус (—) в приведенном соотношении объясняется тем, что в сверхпроводящем контуре с токами i_1 и i_2 некоторое одно направление принято за положительное. Представим это соотношение в таком виде:

$$L_1 i_1 = L_2 i_2,$$

откуда получаем

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{L_2}{L_1},$$

т. е. в рассмотренном случае параллельного соединения двух сверхпроводящих ветвей в них устанавливаются токи, обратно пропорциональ-

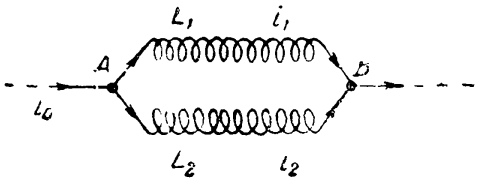


Рис. 154.

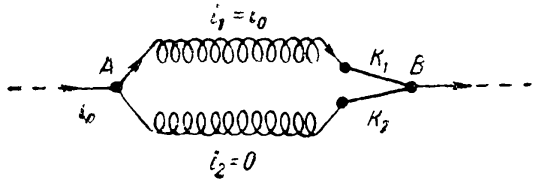


Рис. 155.

ные коэффициентам самоиндукции этих ветвей. Однако это не есть исчерпывающий ответ на вопрос о распределении тока при параллельном соединении сверхпроводников. Характер разветвления токов может оказаться совершенно иным, если мы изменим порядок замыкания цепи.

На рис. 155 представлены две параллельные сверхпроводящие ветви, которые будем считать точно такими же, как и изображенные на предыдущем рис. 154, но только с одной стороны (справа, например) эти ветви могут соединяться при посредстве специальных рубильников K_1 и K_2. Допустим, что указанные рубильники K_1 и K_2 выполнены исключительно из сверхпроводящих частей, так что замкнутый контур, образуемый параллельными ветвями, полностью состоит попрежнему из сверхпроводников. Представим себе теперь, что рубильник K_2 сначала разомкнут. Замыканием внешней цепи установим какой-либо ток i_0, который полностью пройдет через первую ветвь и через предварительно уже включенный рубильник K_1. Затем замкнем рубильник K_2, благодаря чему и вторая ветвь окажется приключенной к двум точкам A и B. Следует вообще иметь в виду, что в случае отсутствия каких-либо индуктивных процессов все точки сверхпроводника, по которому течет установившийся электрический ток, всегда принципиально имеют один и тот же потенциал. В связи с этим в рассматриваемом случае разность потенциалов между точками A и B равна нулю. Приключение к данным точкам второй ветви не должно вызвать возникновения в ней какого-либо электрического тока, т. е. мы будем иметь

$$i_2 = 0.$$

К тому же заключению можно притти и путем рассмотрения потока самоиндукции, который связан со сверхпроводящим замкнутым контуром, образованным соединенными вместе ветвями, первой и второй. Действительно, когда при разомкнутом рубильнике K_2 ток i_0 проходил по первой ветви, с нею сцеплялся поток самоиндукции

$$\Phi_s = L_1 i_0.$$

После замыкания рубильника K_2 этот магнитный поток оказывается зафиксированным благодаря сверхпроводящему контуру, который его охватывает, так что имеем

$$\Phi_s = L_1 i_0 = \text{Const.}$$

Но тот же магнитный поток может быть выражен и через токи i_1 и i_2:

$$\Phi_s = L_1 i_1 - L_2 i_2.$$

Таким образом, получаем уравнение

$$L_1 i_1 - L_2 i_2 = L_1 i_0.$$

Вместе с тем имеем второе уравнение

$$i_0 = i_1 + i_2.$$

Решением этих двух уравнений будет

$$\begin{aligned} i_1 &= i_0, \\ i_2 &= 0. \end{aligned}$$

Итак, распределение токов в системе нисколько не изменится после замыкания рубильника K_2.

Мы могли бы поступить и иначе. Сначала при разомкнутом рубильнике K_1 и включенном рубильнике K_2 устанавливаем ток i_0, а затем включаем рубильник K_1. В таком случае мы получим

$$\begin{aligned} i_1 &= 0, \\ i_2 &= i_0. \end{aligned}$$

Наконец, исходя из состояния системы, изображенного на рис. 155, мы можем немного ослабить ток i_0, соответствующим образом регулируя добавочное сопротивление во внешней части цепи (не показанное на рис. 155). Тогда, основываясь на соотношении

$$L_1 i_1 - L_2 i_2 = \Phi_s = \text{Const.},$$

мы должны будем утверждать, что действительное направление токов в ветвях будет такое, как это указано стрелками на рис. 156: несколько уменьшившийся ток i_1 продолжает течь от точки A к точке B, а вновь возникший ток

$$i_2 = \frac{L_1 i_1 - \Phi_s}{L_2}$$

будет течь от точки B к точке A.

Вообще же, надлежащим образом оперируя рубильниками K_1 и K_2 в начальной стадии установления тока и затем по произволу изменяя силу тока i_0 при обоих включенных рубильниках, мы можем получить

любое заданное наперед соотношение между силами токов i_1 и i_2, протекающих по двум параллельным сверхпроводящим ветвям. Всё это весьма дисгармонирует с нашими обычными представлениями об электрических токах и их возможных разветвлениях.

Рассматривая случай разветвления тока, схематически изображенный на рис. 155, мы не делали никаких ограничений в отношении геометрических размеров каждой из сверхпроводящих ветвей. Для того чтобы с наибольшей наглядностью демонстрировать совершенно необычный характер прохождения тока в подобных случаях, можно довести до предела различие двух параллельных сверхпроводящих путей тока. Допустим, что первая сверхпроводящая ветвь (рис. 157) представляет собой сколь угодно длинный провод, вторая же ветвь между точками

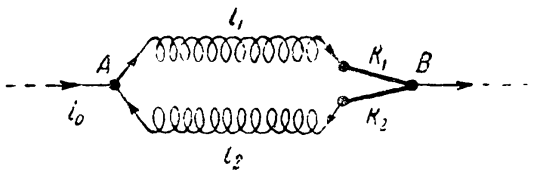


Рис. 156.

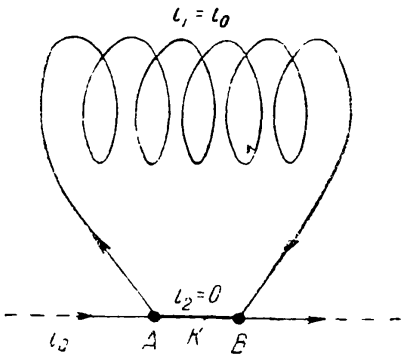


Рис. 157.

AB сведена к одному лишь сверхпроводящему рубильнику, который может коротко замыкать первую ветвь. Поступаем так же, как это мы делали применительно к схеме, изображенной на рис. 155. Сначала рубильник K разомкнуть. Замыканием внешней цепи устанавливаем ток i_0, который пройдет через длинную ветвь, так что будем иметь:

$$i_1 = i_0 .$$

Затем замыкаем рубильник K. Ничто при этом не изменится в отношении распределения тока. Ток i_0 попрежнему будет полностью протекать лишь через длинную ветвь, а через *коротко замыкающий* рубильник K никакой ток не пройдет. Иными словами получаем:

$$i_1 = i_0 ,$$
$$i_2 = 0.$$

И это будет происходить именно так, несмотря на то, что между точками A и B электрическому току предоставляется сколь угодно короткий путь через рубильник K, сопротивление которого равно нулю, в то время как первая ветвь, берущая на себя весь ток i_0, может состоять из тонкого проводника чрезвычайно большой и совершенно произвольной длины (хотя бы, например, в сотни или тысячи километров).

По поводу случаев разветвления тока, представленных на рис. 154—157, можно снова повторить то, что было уже сказано в § 52 (по поводу схем, изображенных на рис. 134—139).

Если электрический ток в сверхпроводниках осуществляется движением тех же электронов, которыми, согласно современным представлениям, обусловлена обычная металлическая проводимость, то необходимо признать, что в рассмотренных случаях сверхпроводимости

проявляются какие-то неизвестные доселе и весьма удивительные свойства электронов. *Путь их прохождения полностью зависит от потока самоиндукции, т. е. от обстоятельств, внешних по отношению к проводнику.* При известных условиях эти электроны могут оказаться не в состоянии перемещаться по кратчайшему расстоянию между точками A и B (рис. 157), хотя сверхпроводник на этом пути сам по себе обладает теми же физическими свойствами, что и на сколь угодно длинном пути действительного прохождения тока. Эти электроны ведут себя как совершенно несамостоятельные и несвободные. Они как-то подчиняются потоку самоиндукции, двигаясь только по пути, разрешаемому им этим магнитным потоком. Распределение потока самоиндукции в системе сверхпроводников является главным фактором, определяющим условия прохождения электрического тока.

Общий вывод из всего этого может быть только такой:

В процессе электрического тока движение элементарных электрических зарядов не играет той основной роли, которая обычно приписывается этому движению.

§ 57. Энергетические процессы в сверхпроводящих цепях

а. Для более полного ознакомления со свойствами сверхпроводящих цепей представляется целесообразным остановиться еще на рассмотрении тех энергетических процессов, которые могут совершаться в системе такого рода цепей. Электрическое сопротивление сверхпроводников равно нулю. Поэтому о возникновении в них джоулева тепла говорить не приходится. Возможны только энергетические процессы электромагнитного характера, т. е. процессы, связанные с явлением электромагнитной индукции и с движениями частей системы сверхпроводящих цепей под влиянием электромагнитных сил.

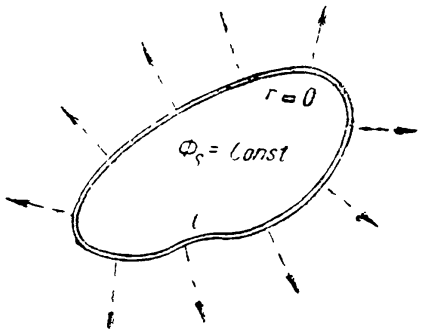


Рис. 158.

Коснемся сначала простейшего случая какой-либо одной сверхпроводящей цепи, по которой протекает ток (рис. 158). В этом случае действие электромагнитной силы будет проявляться в стремлении увеличить размеры контура цепи, растянуть его и сделать охватываемую им площадь возможно больше. Соответствующими стрелками на рис. 158 показаны отдельные составляющие электромагнитной силы, приложенные к различным участкам контура. Такое действие электромагнитной силы вытекает из существования бокового распора магнитных линий, образующих поток самоиндукции. Если контур не жесткий и возможно его деформирование, то он и растянется, приняв форму круга. В связи с увеличением охватываемой им площади возрастает также коэффициент самоиндукции L, зависящий, как известно, только от геометрических размеров и конфигурации контура. Но магнитный поток, связанный со сверхпроводящей цепью, измениться не может. Количество магнитных линий, пронизывающих данный контур, остается постоянным:

$$\Phi_s = \text{Const}.$$

Увеличение же коэффициента самоиндукции в рассматриваемом случае должно сопровождаться уменьшением силы тока i, так как

$$i = \frac{\Phi_s}{L}.$$

Вместе с тем уменьшается и электрокинетическая энергия, равная

$$T_e = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \Phi_s i,$$

как это вытекает также из общих соображений. Дело в том, что при отсутствии какого бы то ни было постороннего источника энергии работа электромагнитных сил может совершаться только за счет собственного запаса энергии в системе.

Представляет некоторый интерес вопрос о том, как в данном случае осуществляется процесс электромагнитной индукции, который несомненно здесь имеет место вследствие происходящих в системе изменений. Исходя из второй (максвелловской) формулировки закона электромагнитной индукции, можем написать

$$e_s = -\frac{d\Phi_s}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L\frac{di}{dt} - i\frac{dL}{dt} = e_s' + e_s'' = 0,$$

где

$$e_s' = -L\frac{di}{dt},$$

$$e_s'' = -i\frac{dL}{dt}.$$

Отсюда, конечно, вытекает

$$e_s' = -e_s''.$$

Полная электродвижущая сила самоиндукции (e_s), возникновения которой можно было ожидать в связи с происходящими в цепи изменениями, оказывается равной нулю по причине постоянного сохранения величины Φ_s. С внешней стороны всё обстоит так, как будто бы совершенно отсутствует какая-либо индуктированная электродвижущая сила. Однако это только так кажется. В действительности же в рассматриваемом сверхпроводящем контуре одновременно появляются две составляющие e_s, именно e_s' и e_s'', равные по абсолютной величине и обратные по знаку. В данных условиях они раздельно не могут быть обнаружены и всегда в точности компенсируют одна другую.

Указанные электродвижущие силы всё же могут быть обследованы, каждая в отдельности, если в нашем распоряжении имеется цепь тех же геометрических размеров, что и сверхпроводящий контур, но обладающая конечным электрическим сопротивлением ($r > 0$). В подобной несверхпроводящей цепи ток i приходится поддерживать при помощи некоторого генератора. Контур такой цепи будет, конечно, подвергаться воздействию тех же сил, стремящихся его деформировать, как это было рассмотрено в отношении сверхпроводящего контура (рис. 158). Здесь можно представить себе два случая.

Случай первый. Контур жесткий и потому не может деформироваться под влиянием растягивающих его сил электромагнитного характера. Следовательно, для этого контура:

$$L = \text{Const}.$$

Допустим, что сначала действующая в данном контуре посторонняя электродвижущая сила постоянна, а возбуждаемый ею ток i уже

установился и не изменяется. Затем начнем уменьшать указанную электродвижущую силу. В связи с этим и ток начнет ослабевать, т. е.

$$\frac{di}{dt} < 0.$$

Возникающая электродвижущая сила самоиндукции будет

$$e_s' = -L\frac{di}{dt} > 0.$$

Электродвижущая сила e_s' направлена в ту же сторону, что и основная (внешняя) электродвижущая сила, возбуждавшая ток, и легко может быть констатирована опытным путем, так как благодаря ее наличию внешняя электродвижущая сила в каждый данный момент времени будет меньше, чем это требуется падением напряжения ri. Электродвижущая сила самоиндукции e_s' в рассматриваемых условиях стремится поддержать силу тока неизменной. Точно такой же характер носит и указанная выше первая составляющая полной электродвижущей силы самоиндукции e_s в сверхпроводящем контуре.

Случай второй. Контур не жесткий и будет деформироваться благодаря действующим на него электромагнитным силам, причем его коэффициент самоиндукции увеличивается. Предположим, что при помощи соответствующей регулировки основной электродвижущей силы ток в цепи всё время поддерживается неизменным:

$$i = \text{Const}.$$

Теперь имеем:

$$\frac{dL}{dt} > 0$$

$$e_s'' = -i\frac{dL}{dt} < 0.$$

Внешняя электродвижущая сила должна будет преодолевать обратную электродвижущую силу самоиндукции e_s''. Для поддержания тока i неизменным окажется необходимым соответственно увеличивать внешнюю электродвижущую силу, в чем возможно убедиться на опыте путем надлежащих измерений. В этом случае мы будем иметь дело с такой же электродвижущей силой, как и вторая составляющая полной электродвижущей силы самоиндукции, возбуждаемая в сверхпроводящем контуре при его растяжении.

Таким образом, в деформирующемся сверхпроводящем контуре следует признать наличие двух равных по абсолютной величине и обратных по знаку индуктированных электродвижущих сил, которые обусловливаются происходящими в системе изменениями общих электромагнитных условий, хотя поток самоиндукции и сохраняется строго постоянным.

Мы еще не умеем в достаточной степени всесторонне использовать представление об электротоническом состоянии (§ 55) при описании явлений электромагнитной индукции. Можно, однако, отметить следующее обстоятельство. При растяжении сверхпроводящего контура ток в нем ослабевает, надо полагать, в непосредственной зависимости от того, что магнитная индукция в поле потока самоиндукции уменьшается у самой поверхности сверхпроводника, ограничивающей область распространения этого потока.

Всё, что мы говорили о растягиваемом сверхпроводящем контуре, можно применить и к обратному случаю, когда контур подвергается сжатию под действием внешних механических сил. Работа этого сжатия, совершаемая внешним деятелем, будет сопровождаться одновременным увеличением электрокинетической энергии системы за счет того же внешнего деятеля, преодолевающего боковой распор магнитных линий потока самоиндукции. Вместе с тем рассмотренные выше две составляющие индуктированной электродвижущей силы, e_s' и e_s'', имеют место и в данном случае, но только знаки их становятся обратными тому, что было при растяжении сверхпроводящего контура.

6. Ввиду принципиально важного значения энергетических процессов, могущих протекать в описанном выше случае одного сверхпроводящего контура (рис. 158), весьма поучительно будет прибегнуть к рассмотрению механической аналогии, представляющей собою дальнейшее развитие более простого случая механической системы, на которой мы останавливали наше внимание в § 22 Главы III.

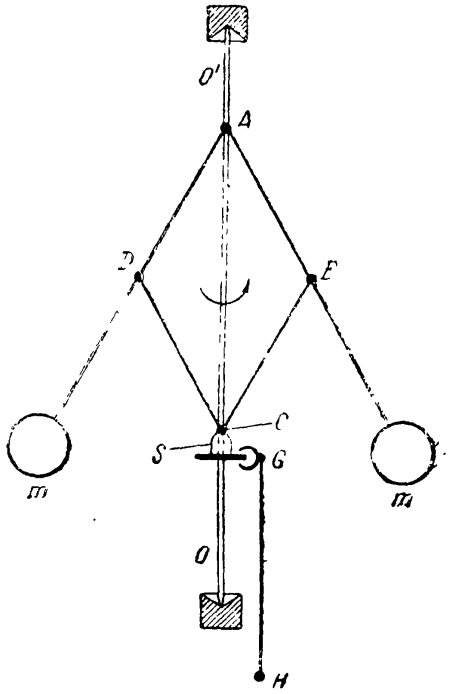


Рис. 159.

Представим себе некоторую вращающуюся систему (рис. 159), в основном подобную обычному центробежному регулятору и состоящую из двух массивных шаров mm, закрепленных на концах стержней AB и AD. Эти стержни вместе с двумя другими стержнями CB и CD образуют параллелограм с шарнирными соединениями в точках A, B, C и D. Шарнир A прочно связан с осью OO'. Вдоль этой оси может свободно скользить вверх или вниз втулка S, несущая на себе соответственным образом выполненный шарнир C. Положение скользуна S определяется той или иной установкой вилки G, охватывающей край небольшого диска, которым заканчивается внизу этот скользун S. Вилка G связана тягой GH с точкой H, сохраняющей неподвижное положение при некотором неизменном режиме вращения системы.

Если данная система вращается вокруг оси OO' с угловой скоростью ω и момент инерции ее есть I, то она обладает кинетической энергией

$$T_m = \frac{1}{2} I\omega^2.$$

Предположим теперь, что в рассматриваемой системе полностью отсутствуют какие бы то ни было трения, могущие вызвать рассеяние сообщенной ей энергии вращательного движения.

В таком случае момент количества движения в этой системе не может как-либо изменяться и сохраняется постоянным независимо от того, подымается или опускается скользун S, перемещающийся вдоль оси OO'. Обозначая этот момент количества движения через Q (по некоторым причинам отступаем от обычно принятого в механике буквенного символа), мы можем, следовательно, написать:

$$Q = I\omega = \text{Const.}$$

Величина Q является аналогом магнитного потока Φ_s, охватываемого сверхпроводящим контуром (рис. 158) и подчиняющегося подобному же соотношению:

$$\Phi_s = Li = \text{Const.}$$

Угловая скорость ω есть аналог силы тока i. Соответственно, момент инерции I есть аналог коэффициента электромагнитной инерции, т. е. коэффициента самоиндукции L. И подобно тому, как величина L есть функция геометрических размеров и формы контура цепи, величина I в рассматриваемых условиях будет зависеть только от конфигурации данной вращающейся системы, т. е. от положения скользуна S на оси OO'.

Кинетическая энергия этой материальной системы по своей форме $\left(\frac{1}{2} I\omega^2\right)$ подобна электрокинетической энергии цепи тока $\left(\frac{1}{2} Li^2\right)$.

Вращающий момент R, могущий изменять угловую скорость ω, есть аналог электродвижущей силы e, которую мы трактуем в качестве причины, могущей изменять силу тока i.

Механическая связь скользуна S с некоторой точкой H, осуществляемая при посредстве стержня GH и обусловливающая ту или иную степень раздвижения шаров mm, является аналогом того ограничения магнитного потока Φ_s, которое осуществляется сверхпроводящим контуром и которое препятствует потоку Φ_s распространяться в стороны.

Вращающаяся система (рис. 159) сама по себе будет стремиться поднять скользун S, в связи с чем стержень GH испытывает действие растягивающих его сил. И в этом отношении всё происходит аналогично случаю электрической цепи, контур которой подвергается действию электромагнитных сил, стремящихся его растянуть (рис. 158).

Всякое перемещение скользуна S вдоль оси OO', которое будет иметь место при соответствующем изменении положения точки H, должно сопровождаться изменением конфигурации вращающейся системы. Вместе с тем должны изменяться также скорость вращения ω и момент инерции I. При этом в данной системе появляется реакция даламберовских сил инерции в форме, так сказать, внутреннего вращающего момента R_D:

$$R_D = -\frac{dQ}{dt}.$$

Принимая далее во внимание, что при отсутствии всяких трений в системе момент количества движения Q сохраняется постоянным, можем написать:

$$R_D = -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d(I\omega)}{dt} = -I\frac{d\omega}{dt} - \omega\frac{dI}{dt} = R_D' + R_D'' = 0,$$

где

$$R_D' = -I\frac{d\omega}{dt},$$

$$R_D'' = -\omega\frac{dI}{dt}.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае оказывается, что результирующая величина реакции вращающейся материальной системы, т. е. полная величина внутреннего вращающего момента R_D, равняется нулю. Иными словами, две составляющие этого вращающего момента,

R_D' и R_D'', равны по абсолютной величине и обратны по знаку. Они являются аналогами e_s' и e_s'' — двух составляющих полной электродвижущей силы самоиндукции, возникающих в сверхпроводящем контуре при его деформировании.

Вращающие моменты R_D' и R_D'' могут быть порознь обнаружены и обследованы на опыте. При постоянном моменте инерции I всякое изменение угловой скорости ω сопровождается возникновением реакции системы в форме вращающего момента R_D'. В случае же принудительного поддержания угловой скорости ω постоянной изменение момента инерции I вызывает в системе реакцию в форме вращающего момента R_D''.

При перемещении скользуна S вверх под действием механических сил, проявляющихся в самой вращающейся системе, работа этого перемещения может совершаться только за счет собственного запаса кинетической энергии T_m, которая, следовательно, должна уменьшаться.

Для опускания скользуна S вниз необходимо произвести работу при помощи какого-либо внешнего деятеля и за счет этой его работы увеличивается T_m.

Напоминаем, что все описанные изменения режима вращения материальной системы (рис. 159) происходят при сохранении начальной величины момента количества движения

$$Q = I\omega = \text{Const.}$$

Подобно этому изменения режима тока в сверхпроводящем контуре совершаются при сохранении начальной величины потока самоиндукции:

$$\Phi_s = Li = \text{Const.}$$

Ввиду некоторого интереса, представляемого рассмотренной аналогичностью процессов, происходящих в механической и электромагнитной системах, мы даем ниже сводку сходственных величин, характеризующих обе категории процессов:

Механическая система	*Электромагнитная система*
ω	i
I	L
$Q = I\omega = \text{Const.}$	$\Phi_s = Li = \text{Const.}$
$T_m = \frac{1}{2} I\omega^2$	$T_e = \frac{1}{2} Li^2$
R	e
$R_D = -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d(I\omega)}{dt}$	$e_s = -\frac{d\Phi_s}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt}$
$R_D' = -I\frac{d\omega}{dt}$	$e_s' = -L\frac{di}{dt}$
$R_D'' = -\omega\frac{dI}{dt}$	$e_s'' = -i\frac{dL}{dt}$

На первый взгляд, в сопоставлении этих двух перечней величин можно усматривать хотя и далеко идущее, но всё же чисто формальное их сходство. Однако, если принять во внимание сказанное раньше о вероятности вихревой природы элементарных составляющих магнитного потока (см. §§ 5, 29, 30, 55), то естественно возникает предположе-

ние, что не исключена возможность более глубокого содержания рассмотренной сходственности. В связи со сказанным целесообразно еще раз привести слова Ньютона, которые в большой мере оправдывают использование аналогий: „... не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда и проста и всегда сама с собой согласна“ (см. § 22 Главы III).

в. В случае двух или нескольких сверхпроводящих контуров процесс их электромагнитного взаимодействия в известной степени, конечно, осложняется, но в основном и здесь общий характер происходящих явлений остается такой же, как и в случае одного контура.

Рассмотрим в виде примера два сверхпроводящих контура, по которым проходят одинаково направленные токи i_1 и i_2 (рис. 160). Магнитные потоки, сцепляющиеся с каждым из контуров, остаются постоянными, каким бы изменениям система ни подвергалась в отношении формы и расположения. Ради простоты допустим, что оба контура жесткие. Следовательно, могут происходить только перемещения контуров относительно друг друга. При одинаковом направлении токов i_1 и i_2 контуры, как известно, будут сближаться. В виду отсутствия внешних источников энергии величина электрокинетической энергии T_e будет при этом уменьшаться, так как работа перемещения, производимая электромагнитной силой, в рассматриваемых условиях может совершаться лишь за счет собственного запаса энергии данной системы токов. Сближение контуров будет сопровождаться возрастанием их коэффициента взаимной индукции M. Так как в то же время электрокинетическая энергия, вообще равная

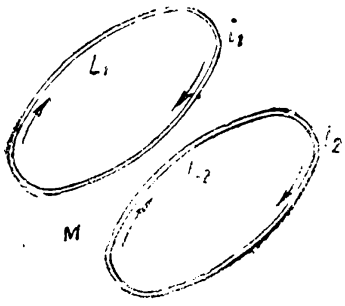


Рис. 160.

$$T_e = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2,$$

должна уменьшаться и вместе с тем мы имеем

$$L_1 = \text{Const.},$$
$$L_2 = \text{Const.},$$

то очевидно, что происходит уменьшение силы токов i_1 и i_2.

С целью дальнейшего упрощения описания явлений, совершающихся в данной системе, предположим, что контуры тождественны по форме, т. е.

$$L_1 = L_2,$$

и что

$$i_1 = i_2.$$

Если контуры вначале были беспредельно удалены друг от друга, то мы имели

$$M = 0,$$

и электрокинетическая энергия системы могла быть представлена в виде

$$T_e = \frac{1}{2} L_1 i_2^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 = L_1 i_1^2.$$

При сближении контуров до предела мы получим

$$M = L_1 = L_2.$$

В то же время обособленные ранее магнитные потоки каждого из контуров претерпят преобразование и сольются теперь в один общий поток, сцепляющийся с обоими токами. При этих условиях полный поток, сцепляющийся с одним из контуров, например с первым, будет выражаться так:

$$\Phi_1 = L_1 i_1' + M i_2'.$$

Так как силы токов в обоих контурах одинаковы, то, принимая во внимание вышеуказанное соотношение между L_1, L_2 и M, можем написать

$$\Phi_1 = L_1 (i_1' + i_2') = 2 L_1 i_1'.$$

В силу того, что магнитный поток, сцепляющийся с рассматриваемым сверхпроводящим контуром (первым), всё время сохраняется неизменным, и разумея под i_1 начальную силу тока в этом контуре, когда он был беспредельно удален от второго контура, мы можем написать следующее соотношенне:

$$2 L_1 i_1' = L_1 i_1,$$

откуда получаем

$$i_1' = \frac{1}{2} i_1.$$

Аналогично можем написать

$$i_2' = \frac{1}{2} i_2 = \frac{1}{2} i_1.$$

Иными словами, при предельно тесном сближении рассматриваемых сверхпроводящих контуров сила тока в каждом из них уменьшается вдвое по сравнению с тем, что было в условиях очень большого их раздвижения. Принимая это во внимание, мы можем нижеследующим образом представить электрокинетическую энергию для случая двух данных контуров, сближенных до предела:

$$T_e' = \frac{1}{2} L_1 i_1'^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2'^2 + M i_1' i_2' = \frac{1}{8} L_1 i_1^2 + \frac{1}{8} L_2 i_2^2 + \frac{1}{4} i_1 i_2 =$$

$$= \frac{1}{2} L_1 i_1^2 = \frac{1}{2} T_e.$$

Итак, мы видим, что в описанном случае предельного сближения двух сверхпроводящих контуров их общая электрокинетическая энергия уменьшилась вдвое. За счет именно этого уменьшения запаса энергии в системе и была совершена электромагнитной силой механическая работа сближения контуров.

Обратим внимание на то обстоятельство, что энергия потока взаимной индукции, бывшая вначале равной нулю при беспредельном удалении контуров друг от друга, возрастает до величины

$$M i_1' i_2' = \frac{1}{4} L_1 i_1^2 = \frac{1}{4} T_e$$

при наибольшем возможном их сближении.

Это произошло за счет первоначального запаса энергии в системе, равного $L_1 i_1^2$. Половина этого запаса израсходована на совершение

механической работы сближения контуров. Половина остатка пошла на образование потока взаимной индукции. И только $\frac{1}{4} L_1 i_1^2$ составляет в конце концов энергию обоих потоков самоиндукции:

$$\frac{1}{2} L i_1'^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2'^2 = \frac{1}{4} L_1 i_1^2,$$

равную одной четверти первоначальной величины T_e.

Если теперь представить себе обратный случай, а именно, что внешняя механическая сила производит работу раздвижения контуров от одного крайнего их положения (возможно более тесное сближение) до другого крайнего положения (беспредельное их удаление друг от друга), то и все энергетические процессы в данной системе будут совершаться в обратном направлении. В конце концов окажется, что сила тока в каждом из контуров увеличится вдвое и вдвое же возрастет величина электрокинетической энергии системы (за счет работы внешнего двигателя).

Во всё время сближения или раздвижения сверхпроводящих контуров в них будет иметь место явление электромагнитной индукции, которое может быть описываемо по схеме, разобранной выше применительно к более простому случаю одного деформируемого контура (рис. 158), но только при наличии двух контуров необходимо будет учитывать, кроме электродвижущих сил самоиндукции, также еще и электродвижущую силу взаимной индукции.

§ 58. Переход от сверхпроводящей цепи к обычной цепи

а. Рассмотрим некоторую сверхпроводящую цепь, по которой проходит постоянный ток i_0 (рис. 161). Допустим, что эта цепь обладает коэффициентом самоиндукции L и состоит, например, из свинцовой проволоки, охлажденной до температуры кипящего гелия. Свинцовая проволока может в общем случае иметь различные сечения на протяжении своей длины. Пока проволока сохраняет свойство сверхпроводимости, все точки ее находятся при одном и том же электрическом потенциале, т. е. разность потенциалов между любыми двумя точками цепи равна нулю. В связи с этим в данной системе отсутствует какое-либо электрическое поле. *Единственным признаком происходящего в цепи электрокинетического процесса служит магнитное поле тока i_0, которое проявляется в форме потока самоиндукции Φ_s, равного Li_0.*

Наличие тока i_0 и потока самоиндукции Φ_s обусловливает то обстоятельство, что с рассматриваемой цепью связан запас электрокинетической энергии

$$T_e = \frac{1}{2} \Phi_s i_0 = \frac{1}{2} L i_0^2.$$

Из всего изложенного выше (§§ 21, 46, 47 и 48) следует, что указанная энергия находится не внутри проводника данной цепи, а распределена в окружающем проводник пространстве, занимаемом потоком самоиндукции Φ_s, причем на долю каждой магнитной линии, входящей в состав этого потока, приходится часть полной электрокинетической энергии, равная $\frac{1}{2} i_0$.

Представим себе теперь, что температура свинцовой проволоки, образующей замкнутую цепь, повышается и вместе с тем исчезает свой-

ство сверхпроводимости. Сопротивление цепи, бывшее раньше практически равным нулю, приобретает конечное значение. При этом нарушится то устойчивое и неизменное состояние системы, в котором она находилась при

$$r = 0$$

и которое характеризовалось отсутствием нагревания переохлажденного свинцового проводника.

В создавшихся новых условиях, когда

$$r \neq 0,$$

в проводнике начнет выделяться джоулево тепло, и ток будет непрерывно ослабевать. Мощность этого энергетического процесса в каждый момент

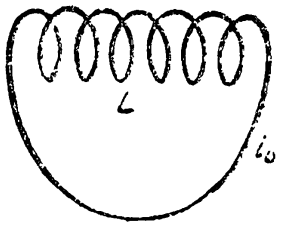


Рис. 161.

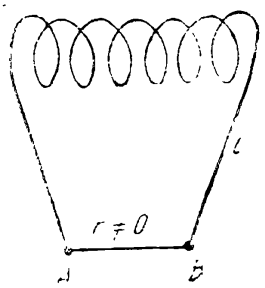


Рис. 162.

времени равна ri^2, и он продолжается до тех пор, пока весь запас энергии в системе, имевший вначале величину

$$T_i = \frac{1}{2} L i_0^2,$$

не израсходуется на нагревание проводника цепи. В конце концов ток совершенно прекратится.

Необходимо сверх того отметить, что в описываемых условиях, когда непрерывно убывающий ток i должен преодолевать сопротивление цепи, между отдельными точками ее может появиться разность потенциалов, и в данной системе, вообще говоря, возникает электрическое поле.

Такова в основном фактическая сторона того, что происходит в электрической цепи после превращения ее из сверхпроводящей в обычную, обладающую конечным сопротивлением.

6. Каким же образом электрокинетическая энергия рассматриваемой системы, распределенная в пространстве вокруг проводника, переходит внутрь этого проводника и превращается там в тепло?

Электрокинетическая энергия есть не что иное, как энергия, присущая потоку самоиндукции Φ_s. По мере образования джоулева тепла в проводнике последовательно убывает величина потока самоиндукции, и он совершенно исчезает одновременно с прекращением тока в цепи. Но реальные магнитные линии (магнитные звенья), входящие в состав этого потока, не могут оказаться как-то исчезнувшими на месте. Об этом мы уже не раз говорили выше (см., например, §§ 18 и 38). Магнитные линии, для того чтобы перестать существовать в одной

определенной области пространства, должны перейти в другое место, унося с собой, конечно, и запас свойственной им энергии. Следовательно, процесс преобразования электрокинетической энергии в джоулево тепло в проводнике неизбежно сопровождается перемещением магнитных звеньев потока самоиндукции из окружающего проводник пространства ввутрь данного проводника, которому они и отдают вносимую ими энергию. Подобное перемещение охватывающих проводник магнитных звеньев тем более необходимо признать соответствующим действительности, что магнитные линии, как известно, обладают продольным тяжением и поэтому контур каждого магнитного звена стремится сократиться. Пока сохранялось свойство сверхпроводимости цепи, стремление магнитных звеньев сократиться встречало противодействие со стороны неизменяющегося электрического тока на поверхности проводника. Но с утратой этого свойства нарушаются условия бывшего раньше устойчивого равновесия в системе и начинает преобладать давление магнитных звеньев извне, так что они последовательно и полностью поглощаются проводником, выходя из состава потока самоиндукции. Признание объективной реальности магнитного потока и образующих его магнитных линий (магнитных звеньев) не оставляет места для какого-либо иного толкования описываемого явления.

Итак, *возникновение джоулева тепла в объеме проводника может быть рассматриваемо только как результат проникновения внешних магнитных линий потока самоиндукции внутрь проводника и соответствующего преобразования вносимой ими электрокинетической энергии в энергию беспорядочного движения элементарных частиц вещества в объеме проводника.*

в. В рассмотренном основном случае перехода от сверхпроводящей цепи к обычной цепи (рис. 161) мы предполагали, что на всём её протяжении одновременно теряется свойство сверхпроводимости. Допустим теперь, что это свойство исчезло лишь на некотором участке цепи, например, между точками A и B (рис. 162), а прочие части цепи остаются сверхпроводящими. В таком случае джоулево тепло начнет выделяться только на участке AB и только этот участок будет расходовать принадлежащую системе электрокинетическую энергию, которая устремляется из пространства, окружающего проводник, в объем, занятый веществом цепи, утратившим свойство сверхпроводимости. В указанный объем энергия будет привноситься поглощаемыми в нем магнитными звеньями потока самоиндукции Li. Однако в отличие от разобранного выше случая (рис. 161), характер движения магнитных звеньев несколько осложняется. Помимо сокращения их в радиальном направлении, они в то же время будут вследствие бокового распора перемещаться и в поперечном направлении, скользя вдоль сохранивших сверхпроводимость частей цепи и собираясь около участка AB, получившего способность поглощать их ($r \neq 0$). Иными словами, магнитные звенья потока самоиндукции, охватывающие участок цепи AB, по мере вхождения их внутрь этого отрезка проводника, будут непрерывно восполняться за счет общего запаса магнитных звеньев, которые окружают сверхпроводящие части цепи.

В тот самый момент, когда на участке AB начинает выделяться джоулево тепло и вся система магнитных линий (магнитных звеньев) потока самоиндукции Li приходит в движение, направляясь к этому участку, в пространстве, где имеет место указанное движение, появляется электрическое поле. Его раньше не было. Возникновение его полностью обусловлено начавшимся перемещением магнитных линий.

Энергия этого электрического поля, очевидно, заимствуется из запаса электрокинетической энергии $\frac{1}{2}Li^2$, расходуемого в цепи тока после исчезновения свойства сверхпроводимости на участке AB. Никакого другого источника энергии электрического поля в данной обстановке не существует. Разность потенциалов между точками A и B, бывшая раньше равной нулю, приобретает теперь некоторую определенную величину, отличающуюся от нуля и равную ri в каждый данный момент времени. Эта разность потенциалов в точности соответствует электродвижущей силе самоиндукции, генерируемой в цепи в связи с убыванием потока самоиндукции Li.

г. Описанная схема последовательного перехода электрокинетической энергии в объем, занятый нагревающимся проводником какой-либо электрической цепи, не может не иметь совершенно общего значения. Так именно необходимо понимать энергетическую сторону всякого процесса образования джоулева тепла в проводнике, по которому идет ток. Иначе рассматривать такого рода преобразования энергии не представляется возможным.

В виде примера остановимся на случае обычной электрической цепи (рис. 163), состоящей из динамомашины G, из какого-либо полезного сопротивления r, включенного между точками A_2 и B_2 и из соединительных проводов A_1A_2 и B_1B_2. Вся мощность тока, генерируемая динамомашиной G, расходуется при установившемся режиме на нагревание частей данной цепи постоянного тока i. В основном джоулево тепло выделяется в полезном сопротивлении r. Практически только сравнительно небольшая доля полной мощности тратится на нагревание соединительных проводов и обмотки динамомашины. Сокращающиеся магнитные звенья входят главным образом в проводник на участке A_2B_2. За счет привносимой ими электрокинетической энергии здесь образуется джоулево тепло, количество которого пропорционально сопротивлению r. При неизменном режиме постоянного тока i указанная убыль магнитных звеньев восполняется благодаря тому, что в процессе электромагнитной индукции, происходящем в динамомашине G, от главного магнитного потока машины непрерывно отпочковываются новые и новые магнитные звенья. Эти магнитные звенья нанизываются на контур цепи и, в своем стремлении возможно равномернее распределиться по цепи, перемещаются вдоль соединительных проводов A_1A_2 и B_1B_2 по направлению к усиленно поглощающему их сопротивлению r. Частично же магнитные звенья, не доходя до участка A_2B_2, будут расходоваться в процессе нагревания проводников арматуры генератора G и соединительных проводов A_1A_2 и B_1B_2.

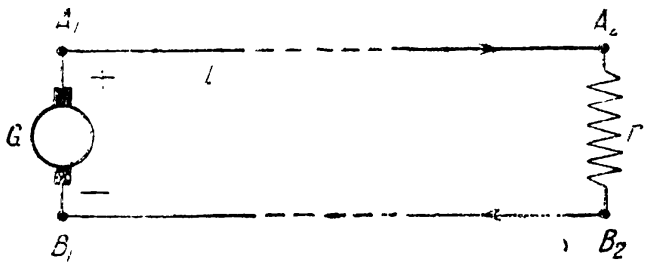


Рис. 163.

Вообще всегда в любой электрической цепи, в которой происходит то или иное преобразование энергии тока в другие виды энергии (джоулево тепло, механическая работа и т. п.), магнитные звенья расходуются на различных участках цепи, черпаясь из их запаса в форме потока самоиндукции. Запас этот обычно восполняется в тех частях цепи, где происходит генерирование тока.

§ 59. Пределы преобразований магнитного потока в проводнике. Гипотеза вихревого электрона

а. Как было разъяснено в предыдущем § 58, из признания объективной реальности магнитного потока неизбежно вытекает утверждение, что тепловые действия электрического тока тесно связаны с непрерывным поглощением магнитных звеньев потока самоиндукции веществом нагреваемого проводника. Входя внутрь проводника и претерпевая там какие-то преобразования, магнитные звенья в конце концов совершенно выбывают из состава потока самоиндукции и как бы прекращают свое существование. Всё это можно и даже необходимо считать вполне достоверным.

Что касается характера преобразований, претерпеваемых магнитными звеньями в проводнике, то здесь можно высказать некоторые предположения, основанные на известных нам свойствах физической реальности, которую мы воспринимаем в качестве магнитного потока. В этом отношении особо важное значение имеют соображения по поводу абсолютной неуничтожаемости магнитных линий.

Если действительно элементарные трубки магнитной индукции представляют собой не что иное, как магнитные вихри в эфире, во всем подобные гельмгольцевским вихревым нитям в идеальной жидкости, то совершенно невероятно чтобы магнитные звенья, оказавшиеся внутри проводника, могли тут совершенно исчезать. К такому же заключению мы приходим и исходя из основных положений максвелловой электродинамики, вполне независимо от каких бы то ни было допущений касательно природы элементарных магнитных линий (§ 49). Таким образом, становится весьма правдоподобным предположение, что магнитные звенья, поглощаемые веществом проводника и продолжающие там непрерывно сокращаться, последовательно доходят в этом уменьшении своих размеров до некоторых пределов, определяемых условиями вихревого движения в эфире. Вполне естественно далее притти к заключению, что сократившийся до чрезвычайно малых размеров магнитный вихрь должен проявляться в форме какой-то своеобразной физической реальности атомного или субатомного масштаба.

б. Теперь возникает очень существенный вопрос: что же собой представляет указанная микрофизическая реальность и как именно она проявляется в общем ходе процессов, которые совершаются внутри проводника, входящего в состав электрической цепи?

Как показал Гельмгольц, каждое вихревое кольцо, вообще говоря, не остается неподвижным в пространстве, но стремится двигаться поступательно. Направление этого поступательного движения вихревого кольца нормально к поверхности, охватываемой кольцом, и совпадает с направлением тех составляющих вращательного движения, которые имеют место сквозь указанную поверхность (см. рис. 67, § 29 Главы IV). На основании этого надо полагать, что сократившийся до очень малых размеров магнитный вихрь по самой природе своей должен двигаться поступательно.

Развивая далее мысли по намеченному пути, можно сказать следующее. Вообще известно, что всякое движение магнитного поля в поперечном направлении сопровождается возникновением электрического поля, которое оказывается перпендикулярным магнитному полю и скорости его перемещения (рис. 164). Из этого вытекает, что с движущимся магнитным вихрем связано электрическое поле, ориентированное

радиально по отношению к центру вихря. Иными словами, движущийся магнитный вихрь, сократившийся до предельно малых размеров, по своим свойствам может быть уподоблен какому-то элементарному электрическому заряду. Если допустить, что это есть наиболее активный, наиболее простой по своей вероятной структуре и вместе с тем обладающий минимальной массой элементарный отрицательный заряд, т. е. заряд электрона, то вышеуказанное радиальное электрическое поле необходимо считать направленным к центру рассматриваемого магнитного вихря, как изображено на рис. 165 пунктирными линиями. Всё будет происходить так, как будто бы в центре движущегося магнитного вихря находится некоторый отрицательный заряд (—). Сплошными стрелками показано направление магнитного поля в данном вихре для случая перемещения его от нас за плоскость чертежа. Если всё сказанное соответствует действительности, то отсюда следует, что *реальное вращательное движение в магнитной вихревой нити оказывается связанным с условным направлением магнитного поля правилом левого винта*, т. е. обратно

Рис. 164.

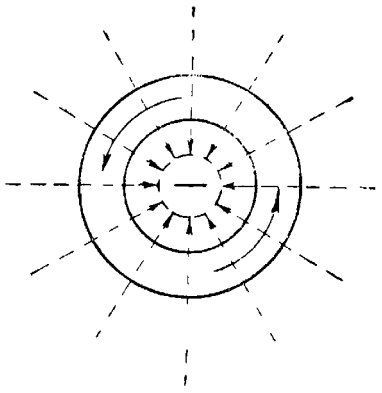


Рис. 165.

тому, как это принято в отношении положительных направлений тока в некотором замкнутом контуре и сопряженного с ним потока самоиндукции.[1] Но направление движения электронов в проводнике связано именно правилом левого винта с направлением потока самоиндукции. Во всяком случае *несомненно, что движение элементарного магнитного вихря должно восприниматься как движение чрезвычайно малого электрического заряда.* Вместе с тем весьма вероятно, что здесь мы имеем дело именно с зарядом электрона.

Необходимо еще отметить следующее обстоятельство, подкрепляющее только-что высказанные соображения. Неподвижные электроны никогда не наблюдались. Физическая наука знает только движущиеся электроны. Можно, конечно, чисто условно говорить о покоящемся электроне. Однако подобного рода рассуждения, надо полагать, не имеют никакого отношения к реальным физическим явлениям.

Итак, рассматривая вопрос о преобразованиях магнитного потока внутри проводника, мы пришли к представлению о вихревой природе электронов. Имея в виду такое понимание структуры электронов, мы и будем пользоваться термином *„вихревой электрон“*.[2]

---

[1] На вероятность этого мы уже указывали в § 55.

[2] К сказанному о вихревом электроне необходимо добавить следующее. Не исключена возможность того, что в процессе преобразования магнитного потока внутри проводника, поглощающего энергию электрического тока, образуются еще и элементарные положительные заряды (см. §§ 60 и 61).

в. В § 5 Главы I мы уже ссылались на гипотезу Кельвина (В. Томсона) о вихревом атоме. Этот ученый основывался на результатах исследований Гельмгольца в области вихревого движения, в особенности на выводах его, касающихся свойств замкнутой вихревой нити (вихревого кольца) в безграничной идеальной жидкости. Гельмгольц, как известно, показал, что такое вихревое кольцо должно представлять собой чрезвычайно устойчивое образование и абсолютно неуничтожаемо. В эпоху Кельвина атом вещества казался именно таким устойчивым образованием, существующим в природе. Атом мыслился как предел деления материальной субстанции мироздания. Разложение атома на какие-либо составные части представлялось совершенно невозможным. Всё это дало повод Кельвину высказать предположение о вихревой структуре атома и отождествить его с вихревым кольцом в эфире. В настоящее время идея о неразложимом атоме обычного вещества отошла уже в область преданий. Наука твердо установила, что атом состоит из более мелких частиц материи, на которые он и разлагается как в физическом эксперименте, так и во многих процессах, постоянно происходящих в природе. В связи с этим гипотеза о вихревом атоме отпадает сама собой. Но мы указывали уже, что сущность общих соображений Кельвина, относящихся к данному вопросу, ни в коем случае не может быть игнорируема. Необходимо только, делая предположение о вихревой структуре предельно малых материальных частиц, иметь в виду не атомы, а те составные части атомов, которые при современных достижениях науки рассматриваются в качестве каких-то элементарных физических реальностей, сохраняющих еще некоторые признаки обычного вещества (масса, например). Таким образом, представление о вихревом электроне не является чем-то по существу новым и совершенно не вытекающим из всей совокупности наших знаний. Это есть лишь некоторая, так сказать, модернизация старой кельвиновской гипотезы о вихревом атоме. И все общие соображения, которые в свое время высказывал Кельвин по поводу вихревого атома, в полной мере приложимы к случаю *гипотезы о вихревом электроне,* но только здесь мы встречаемся с более расширенной трактовкой понятия вихревой нити в эфире и с попыткой вскрытия внутреннего единства элементарного магнитного потока и элементарного электрического заряда. *В этом смысле делается некоторый шаг вперед в связи с общим прогрессом науки о веществе и в то же время синтезируются основные идеи Фарадея, Кельвина, Гельмгольца и Максвелла, имеющие или могущие иметь отношение к проблеме природы электромагнитных явлений.*

§ 60. Общие соображения по вопросу о вихревой природе элементарных электрических зарядов обоих знаков

а. Гипотеза вихревого электрона влечет за собой целый ряд вопросов, касающихся соответствия этой гипотезы реально наблюдаемым свойствам элементарных электрических зарядов. В частности, возникает вопрос о природе электрических зарядов независимо от их знака. Трудно допустить, чтобы элементарный положительный заряд по своему существу принципиально отличался от того, что составляет основу структуры электрона, т. е. элементарного отрицательного заряда. Следовательно, гипотеза вихревого электрона заставляет рассмотреть, насколько правдоподобна мысль о вихревой природе также и в отношении носителей положительного электричества. Возникает еще и ряд других вопросов, касающихся в первую очередь самих электронов.

Во избежание каких-либо недоразумений здесь уместно будет сделать некоторые оговорки. Дело в том, что *содержание настоящего параграфа отнюдь не должно быть понимаемо в смысле каких-либо категорических утверждений.* Речь идет только о том, чтобы хоть до некоторой степени иллюстрировать рядом более или менее вероятных предположений, как можно было бы согласовать гипотезу вихревого электрона с опытными фактами, касающимися этого элементарного электрического заряда, а также наметить пути для решения вопроса о вихревой природе элементарного положительного заряда. Конечно, многое из того, что будет изложено дальше, без сомнения покажется весьма спорным и должно быть проверено надлежащим экспериментом. Только это и может выявить в конце концов, содержится ли в нашей гипотезе о вихревой природе элементарных электрических зарядов какое-либо зерно истины, т. е. имеет ли структура того, что мы называем электрическим зарядом, действительную связь с элементарным магнитным потоком. Итак, *всё содержание этого параграфа необходимо рассматривать лишь в качестве некоторой попытки наметить одно из мыслимых решений проблемы строения элементарных электрических зарядов, как отрицательных, так и положительных.*

6. Остановимся прежде всего на характере распределения электрического поля вокруг электрона. Вообще предполагается, что радиальное электрическое поле медленно движущегося электрона равномерно распределено вокруг него. С точки же зрения рассматриваемой гипотезы и с медленным электроном должно быть связано электрическое поле, ориентированное в основном в плоскости, перпендикулярной направлению движения, т. е. так же, как это теоретически установлено для случая очень быстро движущегося электрона. В связи с этим необходимо отметить, что экспериментально ведь не обследовано электрическое поле сравнительно медленно движущегося электрона и вряд ли подобного рода обследование выполнимо с достаточною степенью точности. Вполне возможно, что указанное неравномерное распределение электрического поля имеет место вообще всегда. Игнорируя электромагнитную природу электрона, его обычно рассматривают как некоторый самодовлеющий электрический заряд, а то или иное магнитное поле электрона считают результатом его соответствующего движения. Исходя из этой предпосылки, при математическом решении вопроса о распределении электрического поля вокруг быстро движущегося электрона, когда его магнитное поле уже никоим образом не может быть оставлено без внимания, вполне естественно и приходят к такому же результату, как это непосредственно вытекает из гипотезы вихревого электрона, согласно которой в основе его структуры лежит элементарный магнитный поток. *Однако, если бы мы всегда учитывали последнее обстоятельство, то во всех случаях, конечно, получали бы в общем одно и то же распределение электрического поля вокруг электрона, независимо от возможных вариаций его скорости.*

С точки зрения гипотезы вихревого электрона величина электрического заряда не есть какая-то константа, которая могла бы характеризовать всякий электрон, и медленно движущийся и очень быстро движущийся. Подлинной константой является лишь элементарный магнитный поток в форме сократившегося до весьма малых размеров магнитного звена. Электрический же заряд вихревого электрона должен зависеть от скорости его поступательного движения. Такой вывод кажется противоречащим общепринятым взглядам и ряду проведенных с большой точностью определений заряда электрона. По этому поводу можно сказать

следующее. Все главнейшие определения заряда электрона относятся к случаям сравнительно быстро движущихся электронов. Между прочим, чаще всего подвергались обследованию электроны, вырывающиеся из атома под влиянием импульса со стороны квантов лучистой энергии. Подобные электроны, вообще говоря, сохраняют большую скорость, которую они имели, когда входили в состав атомов. К тому же надо еще принять во внимание, что заряд электрона обычно получается как статистическое среднее из наблюдений над большим количеством электронов, выделяющихся из атомов вещества в более или менее однородных условиях. Таким образом, и получающиеся результаты носят в значительной степени однородный характер. Некоторые суждения, имеющие касательство к величине элементарного заряда, были основаны на экспериментах, которые позволяли определить отношение заряда к массе электрона. Наблюденные отклонения этого отношения в ту или иную сторону принято объяснять зависимостью массы электрона от его скорости. Конечно, существование такой зависимости не подлежит никакому сомнению, но в то же время весьма правдоподобно предположение, что от скорости электрона зависит и его заряд, но только эта последняя зависимость выражается иною закономерностью. Сочетанием указанных двух факторов, быть может, и объясняются наблюдаемые колебания величины отношения заряда электрона к его массе.

Не исключена, впрочем, возможность и того, что строение вихревого электрона несколько сложнее, а именно, что электрон является парой магнитных вихревых колец, сократившихся до микрофизических размеров и сцепившихся один с другим подобно двум смежным звеньям обычной цепи. Такое сцепление магнитных колец, повидимому, может иметь место в результате их соответствующих преобразований. В рассматриваемом случае заряд электрона не должен столь сильно зависеть от скорости его поступательного движения, как это получается при отождествлении электрона с одним лишь магнитным вихревым кольцом. Вместе с тем и характер распределения электрического поля вокруг подобного медленно движущегося электрона может оказаться более близким к тому, что обычно допускается. Однако всё это не имеет принципиального значения. Едва ли целесообразно останавливаться на этом более детально в первой стадии наших общих предположений, и потому мы ради упрощения всех дальнейших рассуждений будем ограничиваться представлением о структуре электрона как об одном только магнитном вихревом кольце микрофизического масштаба.

Итак, нельзя категорически утверждать, что результаты существующих в настоящее время методов определения заряда электрона никоим образом не могут быть согласованы с гипотезой вихревого электрона.

в. Открытие позитронов, обладающих массой электрона, но имеющих положительный заряд, на первый взгляд несколько дисгармонирует с гипотезой о вихревой природе элементарных носителей электричества. Однако это только так кажется. В действительности же существование позитронов можно было бы даже предвидеть, исходя из гипотезы вихревого электрона. Если электрон есть элементарный магнитный вихрь, естественно движущийся так, как это, согласно Гельмгольцу, должно быть свойственно всякому вихревому кольцу, и если позитрон представляет собой столь же несложное вихревое образование, как и электрон, то вполне правдоподобно предположение, что в случае позитрона мы встречаемся с некоторым вынужденным движением элементарного магнитного вихря в направлении, прямо противоположном естественному

движению вихревого кольца. Возможно ли это? Так как элементарный магнитный вихрь является по существу весьма устойчивой и прочной формой вихревого движения, то он может под влиянием достаточно сильного внешнего импульса, надлежащим образом направленного, начать перемещаться в сторону, обратную нормальному перемещению всякого вихревого кольца, предоставленного самому себе. В таком случае аномально движущийся магнитный вихрь будет эквивалентен элементарному положительному заряду. Надо полагать, однако, что подобное вынужденное движение магнитного вихря окажется весьма неустойчивым и очень кратковременным, так как естественное стремление вихревого кольца перемещаться в строго определенном направлении должно в конце концов получить перевес и заставить вихрь двигаться нормально, если вихревой позитрон не успеет прекратить свое существование в процессе каких-либо специфических преобразований (например, при столкновении с электроном, когда может возникнуть фотон). В действительности как раз и наблюдается нечто подобное в поведении возникающих позитронов. В то время как электроны, играющие важную роль в ряде явлений природы, могут существовать сколь угодно долго, обнаруженные в некоторых физических экспериментах позитроны, повидимому, весьма недолговечны и очень скоро как бы исчезают. Наука не знает длительно существующих позитронов. Всё это позволяет заключить, что *элементарный положительный заряд, имеющий форму позитрона, может быть рассматриваем в полном соответствии с гипотезой вихревого электрона.*

г. Как известно, в состав атомного ядра входят элементарные носители положительного электричества, называемые протонами. По своей абсолютной величине заряд каждого протона считается соответствующим заряду электрона, который в условиях атомной структуры полностью уравновешивает противоположный по знаку заряд одного протона. Масса же протона во много раз больше массы электрона и приблизительно равна массе атома водорода. Можно ли как-нибудь представить себе вихревое образование, по характеру своему близкое строению вихревого электрона и обладающее свойствами протона? По этому поводу приходится, конечно, ограничиться пока только более или менее правдоподобными предположениями. Если принять во внимание, что сократившиеся до весьма малых размеров магнитные вихри, повидимому, обладают способностью образовывать некоторые устойчивые и прочные комплексы или сплетения, то можно утверждать, что мыслимы различные комбинации, до известной степени соответствующие вероятной вихревой природе протона.

В виде простейшего примера напомним один результат теоретического обследования вихревых движений, полученный Гельмгольцем. Он показал, что два однородных вихревых кольца, параллельных одно другому и достаточно сближенных, могут оказаться, так сказать, спаренными. Именно они не отталкиваются друг от друга, а наоборот, образуют в совокупности нечто единое целое, совершая при этом своеобразное движение, представленное на рис. 166. Здесь изображены два спаренных вихревых кольца *I* и *II*, каждое из которых стремится нормально перемещаться в направлении, указанном сплошной прямой стрелкой (в данном случае — слева направо). Но вместе с тем эти вихревые кольца воздействуют друг на друга следующим образом. Кольцо *I*, сокращаясь, проходит сквозь отверстие кольца *II*, как показано пунктирными стрелками, а затем, соответственно расширяясь, обходит в том же направлении вокруг кольца *II* снаружи и т. д. В то же время и кольцо *II* совершает аналогичный обход вокруг кольца *I*, последовательно то расширяясь,

то сокращаясь, т. е. перемещаясь снаружи кольца *I* (пунктирные стрелки), а затем в свою очередь проникая сквозь отверстие кольца *I*. Можно сказать, что кольцо *I* увлекается вихревым движением, происходящим в кольце *II* и, обратно, кольцо *II* участвует в вихревом движении кольца *I*. В результате кольца *I* и *II* вращаются одно вокруг другого в направлении, определяемом вихревым движением в обоих кольцах (в данном примере, вверху рис. 166 — против часовой стрелки, а внизу — по часовой стрелке). Диаметры вихревых колец *I* и *II* всё время пульсируют, и оба они последовательно проходят полный цикл изменения размеров с разностью фаз в 180° одно по отношению к другому. Вихревые кольца совершают описанное вращательное движение вокруг общей осевой линии O_1O_2, имеющей форму кольца.

Теоретически предсказанный характер поведения двух спаренных вихревых колец был в действительности констатирован рядом наблюдателей, экспериментировавших с дымовыми кольцами.

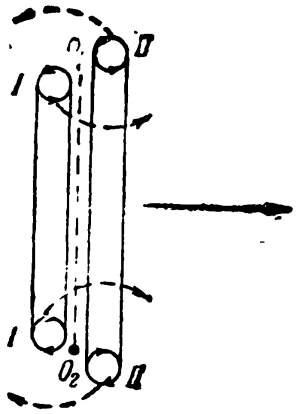


Рис. 166.

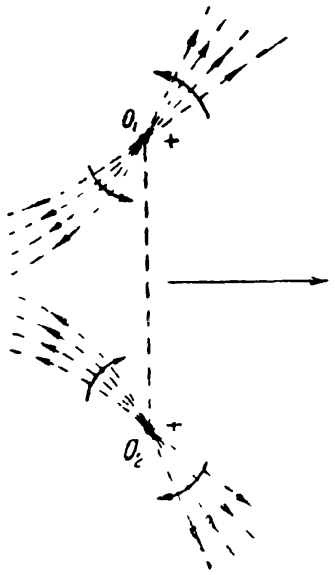


Рис. 167.

Представим себе теперь, что рассматриваемые вихревые кольца являются магнитными вихрями. Если осевая линия неподвижна, то обращающиеся вокруг нее магнитные вихри *I* и *II* должны обусловить возникновение электрического поля, которое оказывается как бы исходящим из всех точек указанной линии O_1O_2. Всё будет происходить так, как будто бы вдоль этой кольцевой линии равномерно распределено положительное электричество. В общем то же самое должно иметь место и в том случае, когда скорость возможного поступательного движения спаренных магнитных вихрей будет меньше скорости их вращательного движения вокруг осевой линии O_1O_2. Получается электрическое поле, которое грубо схематически представлено для некоторого момента на рис. 167 соответствующими пунктирными линиями. Ради упрощения это поле изображено только в плоскости чертежа. Надо полагать, что распределение электрического поля в данном случае не будет равномерным и неизменным по отношению к осевой кольцевой линии O_1O_2, но должно иметь характер двух сгущений, направленных от этой линии и обращающихся вокруг нее соответственно вращению спаренных магнитных вихрей, не показанных на рис. 167. Что касается соотношения между скоростями вращательного и поступательного движения спаренных магнитных вихрей, то вполне возможно ожидать значительного превышения первой скорости над второй, так как, по всей вероятности, скорость вихревого

движения, присущего нитеобразным элементам магнитного потока, чрезвычайно велика. При таких условиях рассматриваемый комплекс магнитных вихрей всегда будет вести себя как положительный заряд. Вместе с тем очень большая скорость вращения спаренных магнитных вихрей вокруг осевой линии O_1O_2 может в достаточной мере обусловить сравнительно большую массу, которую необходимо приписать вихревому комплексу, предположительно воспринимаемому нами в качестве протона. Таким образом, из разобранного примера следует, что *гипотеза вихревого строения протона не содержит в себе никаких принципиальных противоречий.*

д. Остановимся еще на так называемом *спине* электронов. Как известно, детальное изучение электронов, участвующих во внутриатомных процессах, привело к заключению о том, что они в этих условиях обладают некоторым магнитным моментом. Предполагается, что, помимо обращения электронов вокруг центрального положительного ядра, каждый из них совершает еще дополнительное вращение вокруг собственной оси, проходящей через его центр инерции, наподобие волчка или планеты, обращающейся вокруг центрального светила и совершающей сверх того еще вращение около своей собственной оси. Отсюда и произошел термин „спин" (вращение), которым обозначается магнитный эффект, появляющийся в результате указанного приписываемого электрону вращения. Следует, однако, отметить, что, если бы даже рассмотрение внутриатомных процессов и не давало особых поводов признать наличие спина электронов, сама по себе гипотеза вихревого электрона была бы достаточна для того, чтобы предсказать необходимость появления у электрона некоторого магнитного момента в условиях атомной структуры. Действительно, в случае обращения вихревого электрона вокруг положительного ядра (рис. 168) должно нарушиться равенство угловых скоростей в двух половинах магнитного вихря, *I* и *II*, по сравнению с тем, что имеет место при поступательном движении вихревого кольца по прямолинейной траектории. В половине магнитного вихря, *I*, находящейся со стороны центрального ядра, т. е. ближе к ядру, к нормальной угловой скорости чисто вихревого движения ω_0 будет добавляться еще величина ω, равная угловой скорости обращения электрона вокруг ядра. Другая же половина, *II*, более удаленная от положительного ядра, оказывается в иных условиях. Здесь из угловой скорости ω_0 будет вычитаться угловая скорость ω. Таким образом, реальные угловые скорости вращательного движения для сечений магнитного вихря *a* и *b* (в плоскости чертежа) будут:

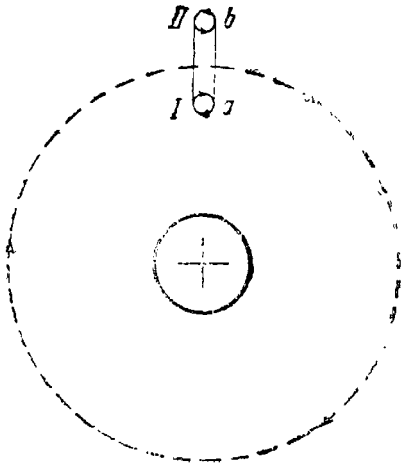


Рис. 168.

для сечения a . . . . . $\omega_0 + \omega$,
для сечения b . . . . . $\omega_0 - \omega$.

Поэтому необходимо предполагать, что интенсивности магнитного процесса в половинах вихря *I* и *II* окажутся разными и магнитные моменты указанных половин, направленные в противоположные стороны, не будут взаимно уравновешиваться, как это было бы при прямолинейном поступательном движении магнитного вихря. *Результирующий магнитный момент вихревого электрона, обращающегося вокруг атом-*

ного ядра, и должен в таком случае восприниматься в качестве спина.

Надо ожидать, что изучение, с развиваемой точки зрения, всех обстоятельств, относящихся к поведению внутриатомных электронов, в особенности изучение спина, может привести к решению одного чрезвычайно важного вопроса, а именно вопроса о порядке угловых скоростей, которыми характеризуется вихревое движение в реальных трубках магнитной индукции, т. е. в физически существующих магнитных линиях. С одной стороны, в качестве исходных данных мы имеем указанные выше соотношения, $\omega_0 + \omega$ и $\omega_0 - \omega$, для угловых скоростей в сечениях вихревого электрона *a* и *b* (рис. 168), а также величину спина электрона. С другой стороны, из количества электричества, носителем которого является вихревой электрон, и из скорости его движения вокруг атомного ядра вытекает вероятная величина элементарного магнитного потока, который предполагается лежащим в основе структуры электрона и к которому относится угловая скорость ω_0.

е. В связи с общими соображениями по поводу гипотезы вихревого электрона возможно высказать еще следующее добавочное предположение. Дело в том, что природа тех квантовых условий, которыми определяются размеры электронной орбиты в атомной системе, еще не вскрыта. С другой стороны, трудно допустить, чтобы сократившийся магнитный вихрь, ведущий себя как электрон, сразу же приобретал самые малые размеры, допустимые свойствами среды (эфира), в которой происходит вихревое движение. Мыслимо, что диаметр вихревого кольца-электрона может колебаться в известных пределах, изменяя свои размеры под влиянием каких-либо внешних импульсов, сопровождающихся отрыванием (отпочкованием) от магнитного вихря какого-то еще меньшего вихревого образования, выделяющегося в качестве, например, фотона. Мы пока не знаем строения фотонов, но несомненно то, что они также имеют электромагнитную природу и, следовательно, являются носителями свойственного им магнитного поля, которое не может, конечно, рассматриваться иначе, как в форме некоторого замкнутого на себя элементарного магнитного потока. Таким образом, по всей вероятности, диаметр вихревого кольца-электрона уменьшается скачкообразно при каждом отрывании от него небольшой части, образующей фотон. В связи с этим должны скачкообразно же изменяться условия устойчивого обращения электрона вокруг центрального положительного ядра. Иными словами, электрон должен переходить скачком с одной орбиты на другую. Возможно также, что возникновение фотоэлектрона, связанное с поглощением фотона атомом, сопровождается увеличением диаметра некоторого внутриатомного вихревого электрона за счет сращивания с ним падающего на атом фотона. При этом увеличении размеров вихревого кольца-электрона опять-таки могут нарушаться условия его устойчивого существования в пределах атомной структуры. Бывшая раньше связь его с центральным ядром может оказаться настолько ослабленной, что он выделяется из атома. Во всяком случае *гипотеза вихревого электрона открывает перспективы в отношении вскрытия сущности внутриатомных квантовых условий.*

ж. Явления диффракции материальных лучей, повидимому, свидетельствуют о том, что электроны и протоны имеют природу волнового характера. Поэтому они рассматриваются как некоторые волновые комплексы или так называемые волновые „пакеты“. Методы формально математического описания и исследования этих волновых процессов основаны на использовании таких представлений (например, фазовые

волны в многомерных пространствах), которые не поддаются простой физической интерпретации. Применение этих вспомогательных представлений есть чисто условный прием, вполне законный при математическом анализе, но не при суждениях об истинной природе физических явлений, когда мы обязаны отвлечься от математической символики, к которой иногда весьма полезно прибегать при формальном изучении того, что совершается в реальной обстановке. При рассмотрении же существа физических явлений уместно говорить лишь о том, что может происходить в действительности. Конечно, реальные волновые процессы, соответствующие электронам и протонам, необходимо трактовать как процессы, происходящие не в каких-то воображаемых многомерных пространствах сколь угодно большого числа измерений, а в нормальном трехмерном пространстве, которое и должно учитываться в качестве объективно реальной формы существования материи.

На первый взгляд может показаться, что гипотеза о вихревой природе электрона и других элементарных носителей электрического заряда совершенно несовместима с твердо установленными фактами диффракции материальных лучей, заставляющими признать наличие волновых процессов в структуре материальных частиц. Однако это противоречие является только кажущимся. Есть полное основание его отрицать. Действительно, в самой идее о вихревом движении уже заключается предпосылка для того, чтобы можно было признать здесь наличие каких-то периодических изменений

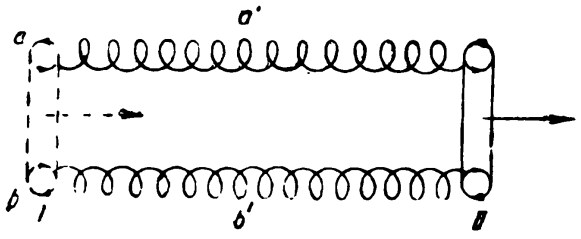


Рис. 169.

С другой стороны, не подлежит сомнению, что указанные волновые процессы резко отличаются от обычных некоторыми специфическими особенностями. Ведь электроны и протоны неизменно и сколь угодно долго могут пребывать в составе атомов вещества, причем энергия свойственного им волнового процесса не рассеивается в окружающем пространстве, а прочно ими удерживается. Следовательно, этот процесс как-то замкнут в себе. Все эти соображения говорят в пользу возможности вполне примирить представление о волновой природе элементарных материальных частиц с гипотезой о вихревом характере структуры этих частиц.

Рассмотрим в виде примера движущийся вихревой электрон (рис. 169). Допустим, что вихревое кольцо, перемещающееся слева направо, из позиции *I* переходит в позицию *II*. За время этого передвижения некоторая точка на окружности сечения вихря a описывает кривую a', имеющую циклоидальный характер. Соответствующая точка на окружности сечения вихря b в то же время описывает циклоидальную кривую b'. Все другие точки сечений a и b описывают аналогичные циклоидальные траектории. Сказанное относится и ко всем прочим сечениям движущегося вихревого кольца-электрона. Таким образом, поступательное движение магнитного вихря эквивалентно распространению некоторого волнового „пакета“, т. е. своеобразного комплекса колебаний, перемещающихся как единое целое в каком-либо одном направлении. Этот движущийся комплекс несомненно обладает электромагнитными свойствами: он включает в себе магнитное поле и органически связанное с ним электрическое поле. Но, повидимому, он не может быть отождествляем с простой комбинацией обычных максвелловских волн. Здесь мы встречаемся с совершенно особенным электромагнитным процессом.

И всё это укладывается в рамки гипотезы о вихревой природе элементарных электрических зарядов вообще. Весьма правдоподобно, что развиваемая точка зрения может лечь в основу объяснения явлений дифракции материальных лучей.

з. Необходимо еще сказать несколько слов по следующему поводу. Дело в том, что во всех предыдущих рассуждениях, касающихся гипотезы о вихревой природе элементарных электрических зарядов, мы совсем не затрагивали вопроса о том, как заканчиваются линии электрического поля в объеме электрона или протона, и сохраняет ли смысл обычное представление об объемной плотности электричества. Это, быть может, один из самых серьезных вопросов, вытекающих из вихревой гипотезы элементарных электрических зарядов. Повидимому, тут мыслим пока только один ответ. Именно, мы еще не знаем всех деталей того, надо полагать, бурного процесса, который происходит в центральной области магнитного вихря или комплекса магнитных вихрей, сократившихся до микрофизического размера. Вполне возможно, что здесь создаются специфические условия, благодаря которым линии электрического поля могут как-то обрываться, так что представление о средней плотности электричества сохраняет свою силу для всего объема электрона или протона в целом. Но, конечно, затруднительно при этом говорить об объемной плотности электричества в какой-либо точке внутри электрона или протона. Впрочем следует подчеркнуть, что примитивная трактовка понятия об объемной плотности электричества в некоторой точке недопустима и в том случае, когда мы рассматриваем электроны или протоны в соответствии с современными научными представлениями об их волновой природе, в связи с чем эти физические реальности считаются лишенными резких границ и как бы расплывающимися в окружающем пространстве. И в данном случае остается открытым вопрос, почему и как обрываются линии электрического поля, заканчивающиеся на элементарных зарядах.

и. Итак, мы подвергли общему рассмотрению главнейшие моменты, характеризующие поведение и свойства материальных носителей элементарных электрических зарядов. Мы видели, что в этом отношении не существует непреодолимых противоречий с гипотезой о вихревой природе электронов, протонов и т. п. Если всё изложенное выше по данному поводу в какой-либо степени соответствует тому, что реально происходит, то из этого вытекает следующее. В § 54 мы познакомились с соображениями Фарадея об электротоническом состоянии. В своих заключительных высказываниях (п. 3269) он, между прочим, ставит вопрос о *„магнитном эквиваленте статического электричества“*. Быть может, гипотеза о вихревом электроне и вообще о вихревой природе всех элементарных электрических зарядов есть не что иное, как именно прямой ответ на выдвинутый Фарадеем чрезвычайно важный вопрос. Действительно, эта гипотеза исходит из допущения, что структура элементарных зарядов включает в себе в качестве главной составной части сократившийся до очень малых размеров магнитный вихрь, т. е. элементарный магнитный поток. С точки зрения рассмотренной гипотезы электрический заряд и магнитный поток не являются какими-то самодовлеющими физическими реальностями, которые могут быть противопоставляемы по существу. Они объединяются идеей о вихревом движении и различаются лишь как две формы восприятия одного и того же физического процесса. Вскрывается, таким образом, их внутреннее единство.

§ 61. Экспериментальное обследование вопроса о „магнитном эквиваленте статического электричества"

а. Не может, конечно, подлежать сомнению, что проблема „магнитного эквивалента статического электричества" имеет большое принципиальное значение как при рассмотрении подлинных соотношений между электрическими и магнитными явлениями вообще, так и при суждении о природе электрического тока, в частности. В связи с этим было бы очень важно непосредственным экспериментом подтвердить возможность возникновения электрических зарядов за счет преобразования в них элементарных составляющих магнитного потока. Автор настоящей книги сделал попытку выполнить это.[1]

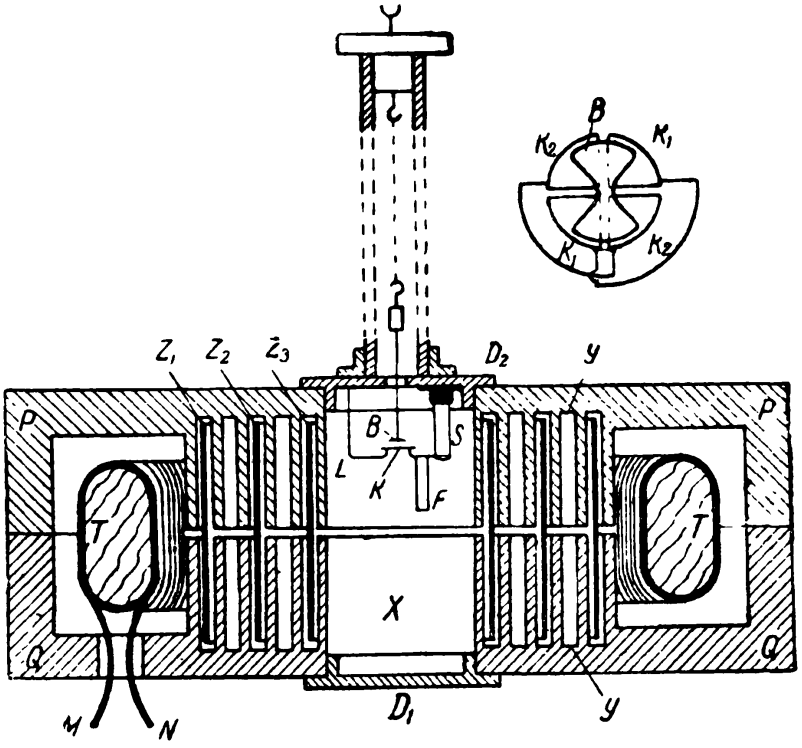


Рис. 170.

Прежде всего необходимо отметить, что описываемые в настоящем параграфе эксперименты могут быть надлежащим образом поняты только на фоне всего того, что было сказано в § 40 Главы IV (а также в предыдущих двух параграфах 59 и 60). Только при этих условиях полученные результаты утрачивают свою полную неожиданность и могут быть рассматриваемы в качестве логического завершения целой цепи взаимно связанных предпосылок.

Обстановка опытов была следующая. В качестве основной части аппарата оказалось наиболее целесообразным воспользоваться тем генератором свободных магнитных звеньев, который был уже описан в § 40, (см. рис. 108). Таким образом, в опытах применялась тороидальная обмотка, окруженная разомкнутым железным экраном. Были произведены только некоторые изменения и дополнения, относившиеся к центральной камере в щеках железного экрана и имевшие целью обнаружение электрических зарядов, которые могли тут появиться в резуль-

[1] Описываемые ниже опыты в основном были произведены мною в период времени с 1929 по 1936 г. При этом было испытано большое число предварительных вариантов экспериментальной обстановки. *В. Миткевич*

тате преобразований свободных магнитных звеньев. Во время экспериментов было испробовано несколько типов электрометра и в конце концов выбор остановился на квадрантном электрометре очень малых размеров. На рис. 170 представлено расположение главнейших частей всего устройства. Здесь T есть тороидальная обмотка, наложенная на деревянный сердечник, M и N — выводы этой обмотки, P и Q — щеки железного экрана, которые плотно соприкасались с внешней стороны, а со стороны центральной камеры X отстояли одна от другой, образуя щель шириною в 0.3 мм. Во время опытов в кольцевые впадины YY всегда были заложены три хорошо изолированных железных цилиндра Z_1, Z_2 и Z_3, преграждавших путь перебегающим магнитным линиям аномального потока и обеспечивавших проникновение в камеру X только свободных магнитных звеньев, которые отпочковывались в процессе преобразований нормального магнитного потока тороидальной обмотки T. Как и в предшествовавших опытах, описанных в § 40, через выводы M и N по этой обмотке пропускается ток (2—3 А) от искрового генератора высокой частоты порядка 10^6 герцев. Камера X, образованная двумя центральными отверстиями в щеках P и Q, имела размеры: диаметр 40 мм, высота около 80 мм. Снизу камера X плотно закрывалась железным днищем D_1. Сверху она также по возможности плотно закрывалась железной покрышкой D_2, сквозь небольшое центральное отверстие которой проходила нижняя часть подвеса, поддерживавшего бисквит B электрометра. Этот электрометр был расположен в верхней половине преобразовательной камеры X. Так как ожидалось возникновение в ней лишь незначительного количества электричества, то электрометр должен был обладать возможно малой емкостью. С этой целью применен электрометр, квадранты которого K имели в диаметре 10 мм. На рис. 170 (вверху направо) изображены отдельно главные части этого электрометра. Квадранты K_1K_1 и K_2K_2 не имели обычной коробчатой формы, а представляли собой простые плоские секторы из тонкой металлической пластинки, попарно соединенные изогнутыми проволочками. Одна пара квадрантов (K_1K_1) припаивалась к поддерживающей проволоке L, непосредственно присоединенной к крышке D_2. Другая же пара квадрантов (K_2K_2) была припаяна к проволочке, которая поддерживалась изолирующим столбиком S из серы. При помощи приспособления, не показанного на рисунке, можно было производить электрическое соединение изолированной пары квадрантов с крышкой D_2, для приведения к нулю разности потенциалов между обеими парами квадрантов. Над плоскими квадрантами, параллельно им и по линии раздела двух соседних пар, располагался очень легкий бисквит B, изготовленный из тонкого алюминиевого листка. Вес бисквита вместе с зеркальцем был около 15 мг. Всё это подвешивалось на кварцевой нити толщиною порядка 0.001 мм. Специальная батарейка служила для поддержания постоянной разности потенциалов, от 70 до 140 V, между бисквитом и квадрантами. В некоторых случаях к проволочке, поддерживающей изолированную пару квадрантов, подвешивалась полоска F из тончайшего алюминия, имевшая размеры 3×15 мм^2. Само собою разумеется, что были применены соответствующие меры для экранировки электрометра от воздействий со стороны генератора высокой частоты. Между прочим, щель между щеками железного экрана PQ плотно закрывалась парафином со стороны камеры X.

Опыт обычно производился в таком порядке. Прежде всего приводилась к нулю разность потенциалов между двумя парами квадрантов. Выжидалось некоторое время, пока совершенно не прекратятся колеба-

ния бисквита, и по шкале отмечалось его нулевое положение. Затем квадранты K_2K_2 отсоединялись от корпуса аппарата. Наконец, пропускался ток через тороидальную обмотку T, что производилось только путем возбуждения высокочастотного генератора, нормально всегда стоявшего выключенным. Цепь обмотки T никогда не прерывалась. Она была неизменно присоединена к генератору. Одновременно с включением тока начиналось наблюдение по шкале за положением бисквита электрометра.

б. Весьма большое число произведенных экспериментов дало следующие результаты, которые на первый взгляд казались в высокой степени странными благодаря их хаотичности и какой-то беспорядочности:

1. Весьма часто случалось, что даже длительное пропускание высокочастотного тока через тороидальную обмотку (20—30 минут) не сопровождалось какими бы то ни было отклонениями бисквита электрометра.

2. Иногда наблюдалось медленное и плавное отклонение электрометра в сторону, соответствующую отрицательной электризации изолированной пары квадрантов.

3. Несколько реже наблюдалось такое же плавное отклонение электрометра в сторону, соответствующую положительной электризации изолированной пары квадрантов.

4. В ряде экспериментов указанное плавное отклонение электрометра в каком-либо одном направлении внезапно сменялось быстрыми и энергичными отклонениями его поочередно в обе стороны от нулевого положения. Этот эффект, обычно весьма кратковременный, производил такое впечатление, как будто бы в камере X возникал какой-то бурный процесс, так сказать, взрывного характера. Иногда, хотя и сравнительно редко, взрывной эффект наблюдался сам по себе, без всякого предварительного плавного отклонения электрометра, и бывало, что в одном и том же эксперименте это повторялось по несколько раз с некоторыми паузами.

в. Необходимо отметить, что в течение длительного экспериментирования, в условиях многократного повторения наблюдений, удалось зарегистрировать достаточно большое количество случаев положительного эффекта (2, 3, 4). В общем можно сказать, что при значительном числе повторных наблюдений примерно 3—5% их сопровождалось взрывным эффектом, в то время как на долю плавных отклонений электрометра приходилось от 15 до 20% всего числа наблюдений. Но случалось и так, что взрывной эффект наблюдался в нескольких экспериментах, непосредственно следующих один за другим.

г. Можно было бы, конечно, пытаться объяснять наблюдавшиеся отклонения электрометра какими-либо дефектами его экранировки от электромагнитных и иных влияний со стороны цепи рядом расположенного высокочастотного генератора. Это требовало чрезвычайной осторожности в оценке полученных результатов и в трактовке их в том смысле, что в описываемых условиях в камере X действительно возникали свободные электрические заряды. Однако разного рода соображения о возможных ошибках, повидимому, утрачивают свое значение, так как в процессе экспериментирования удалось дополнительно констатировать обстоятельство, совершенно непредвиденное и выходящее за пределы того, что можно было бы приписать посторонним влияниям. Именно оказалось следующее:

Иногда отклонения электрометра — плавные или взрывного харак-

тера — начинались не во время прохождения тока через тороидальную обмотку, а лишь спустя несколько секунд после прекращения этого тока, когда генератор высокой частоты уже не работал и какие-либо воздействия его на систему электрометра были абсолютно исключены. Иногда же разного рода отклонения электрометра, без всякого изменения их общего характера, просто продолжались и после прекращения тока в тороидальной обмотке.

Такое своеобразное последействие, многократно констатированное, могло быть наблюдаемо иногда довольно длительно (в продолжение 20—30 секунд и более после прекращения тока) с непрерывно убывающей интенсивностью. Единственное правдоподобное объяснение всему этому состоит, надо полагать, в том, что в течение предшествовавшего процесса преобразований магнитного потока тороидальной обмотки T свободные магнитные звенья накапливались в камере X. Они затем сокращались и пребывали в состоянии беспорядочного движения до момента их обнаружения в форме электризации изолированной пары квадрантов. Указанное беспорядочное движение сократившихся магнитных звеньев, по всей вероятности, должно было сопровождаться их отражением от стенок камеры X, а также прилипанием их к стенкам или поглощением стенками камеры.

д. Описанные явления, во всех их разновидностях, не поддавались нарочитому их воспроизведению по желанию экспериментатора, а наблюдались нерегулярно и как бы самопроизвольно. Это обстоятельство в течение очень долгого времени давало повод считать, что еще не вскрыты все условия, от которых зависит тот или иной эффект, а потому опыты, хотя они и привели к положительному результату, всё же рассматривались автором как не вполне законченные. В конце концов, однако, выяснилось, что от произведенных опытов и нельзя было ожидать чего-либо более определенного в смысле решения основного вопроса: соответствует ли природе вещей сделанное автором предположение о форме и строении „магнитного эквивалента статического электричества"? Действительно, если сократившиеся до микрофизических размеров магнитные звенья преобразуются в камере X в элементарные отрицательные и положительные заряды, то при этом возможны следующие случаи:

1. Отрицательные и положительные заряды возникают в равных количествах. Тогда средняя плотность объемного заряда в камере X должна быть равна нулю, и изолированная пара квадрантов электрометра будет оставаться не заряженной.

2. Отрицательные заряды образуются в избытке по сравнению с положительными зарядами. Изолированная пара квадрантов будет заряжаться отрицательно.

3. В избытке оказываются положительные заряды, сообщающие положительную электризацию изолированной паре квадрантов.

4. Благодаря какому-то нарушению условий однообразного течения процесса в камере X поочередно возникают в избытке то отрицательные, то положительные заряды. Должны будут наблюдаться отбросы электрометра по обе стороны от нулевого положения бисквита.

Именно такой и был общий характер установленного опытом эффекта. Что получится в каждом частном случае, трудно вперед предугадать. Надо думать, что тут всё происходит согласно закономерностям, определяемым теорией вероятностей. Многое должно зависеть от ряда привходящих обстоятельств, которые сами по себе могут казаться ничтожными, но тем не менее они будут в состоянии обусловливать

направление совершающегося в камере X процесса образования элементарных зарядов. Быть может, при этом начинает сказываться тепловое движение молекул газа, которые заполняют камеру X и сталкиваются с сократившимися до микрофизических размеров магнитными вихрями. Мыслимы также всевозможные иные влияния. В связи с этим и должны наблюдаться те нерегулярности в проявлении того или иного эффекта, которые сначала были восприняты как указание на незаконченность экспериментов. В действительности же описанные эксперименты по существу не могли дать больше того, что было ими фактически установлено.

е. Таким образом, всё происходило так, как будто бы при активировании системы, изображенной на рис. 170, путем пропускания переменного или, вообще говоря, изменяющегося тока по тороидальной обмотке T, пространство внутри камеры X приобретает некоторое специфическое состояние. Оно, повидимому, вполне совпадает с тем, что Фарадей назвал *электротоническим состоянием* (см. § 54, п. 3269). Однако в рассмотренных условиях электротоническое состояние может проявляться не в форме каких-либо индуктированных токов, как это было в экспериментальной обстановке, описанной в § 40, а в форме *„магнитных эквивалентов статического электричества“*. Вместе с тем гипотеза о вихревой природе элементарных электрических зарядов получает значительное подтверждение.

Сделанное Фарадеем открытие электромагнитной индукции являлось решением, так сказать, первой части задачи, сформулированной им в 1822 г.: „Обратить магнитизм в электричество“. Именно этим открытием была констатирована возможность генерирования „электричества движущегося“, т. е. электрического тока, путем использования магнитного поля в качестве исходного фактора. Что же касается „магнитного эквивалента статического электричества“, то он оставался до сих пор неизвестным.

Если выводы, к которым мы пришли в результате опытов, описанных в настоящем параграфе, можно признать в какой-либо степени обоснованными и в общем соответствующими действительным соотношениям между областями магнитных и электрических явлений, то позволительно думать, что удалось, наконец, подойти к решению и второй части вышеуказанной задачи, сформулированной Фарадеем.

§ 62. Движение электричества в цепи тока

а. Из всего того, что было изложено в §§ 58—61, вытекает следующее. В процессе электрического тока, протекающего по обычному проводнику с некоторым конечным сопротивлением, магнитные звенья потока самоиндукции непрерывно поглощаются веществом проводника, внося туда соответствующее количество энергии, за счет которого образуется джоулево тепло. Далее, можно считать очень правдоподобным, что указанные магнитные звенья не исчезают бесследно внутри проводника, но сокращаются до микрофизических размеров и преобразуются здесь в элементарные электрические заряды, в основном, вероятно, — в электроны, которые присоединяются к свободным электронам, уже существующим в объеме проводника.

С другой стороны, известно, что всякий электрический ток теснейшим образом связан с движением электричества вдоль цепи тока.

С обычной, в значительной степени примитивной точки зрения это движение электричества и составляет сущность электрического тока. Всё же прочее рассматривается лишь в качестве какого-то дополнения, не имеющего принципиального значения.

С точки же зрения, которая развивается в настоящей VI Главе в полном согласии со всеми высказываниями Фарадея и Максвелла, касающимися вопроса о природе так называемого „электрического тока", наиболее существенная и принципиально неотъемлемая часть этого комплексного физического явления состоит в потоке самоиндукции, распределенном в пространстве вокруг проводника. Справедливость данной точки зрения вполне убедительно доказывается путем рассмотрения и анализа всех случаев сверхпроводимости. Можно представить себе „электрический ток", не сопровождающийся выделением джоулева тепла и даже совершенно не связанный с движением каких бы то ни было обычных носителей электрических зарядов. Но представить себе „электрический ток" без соответствующего потока самоиндукции абсолютно невозможно. Движение же электричества, вообще говоря, всегда имеющее место в процессе „электрического тока", как-то подчиняется потоку самоиндукции, что особенно отчетливо выявляется в ряде случаев сверхпроводящих цепей (см. §§ 53 и 56).

В случае металлического проводника с конечным сопротивлением движение электричества принято ассоциировать с перемещением находящихся внутри проводника электронов в направлении, обратном тому, которое условно рассматривается как положительное направление тока. Электронная теория металлической проводимости исходит из этого основного представления и во всех деталях изучает поведение элементарных электрических зарядов внутри проводника. При этом, однако, магнитный поток самоиндукции совершенно или почти совершенно игнорируется. Как мы уже отмечали выше, указанным недоучетом роли магнитного потока в значительной степени объясняется своего рода трагизм чистой электронной теории, выражающийся в ее бессилии как-либо объяснить самый простой и принципиально самый важный случай проводникового тока. Мы имеем в виду ток сверхпроводимости, характеризуемый отсутствием ряда привходящих обстоятельств. Едва ли можно признать справедливость и исчерпывающую полноту исходных положений теории, трактующей явление металлической проводимости, если она более или менее удовлетворительно справляется только с количественным описанием некоторых сторон этого физического явления в сложных случаях, когда приходится иметь дело с добавочным, второстепенным по своему значению, процессом в форме выделения джоулева тепла, и если эта теория оказывается неприложимой к простейшему случаю сверхпроводящей цепи. Необходимо притти к выводу, что есть какие-то ошибки в исходных положениях такой теории и что она нуждается в весьма существенных коррективах. На такого рода ошибки мы уже обращали внимание в §§ 52 и 56.

Электролитическая проводимость несомненно связана с движением положительных и отрицательных ионов, перемещающихся при прохождении тока по противоположным направлениям. До некоторой степени подобное же движение ионов обоих знаков происходит и при прохождении тока через газы, причем в этом перемещении зарядов обычно играют значительную роль также ничем не отягченные электроны, степень участия которых в процессе тока повышается по мере уменьшения плотности газа. Через совершенный вакуум длительный электрический ток неизменного направления может осуществляться исключительно при

посредстве электронов, отрывающихся от находящегося в вакууме отрицательного электрода (катода). Движение элементарных электрических зарядов происходит и во всех случаях прохождения тока через полупроводники, а также через вещества, относимые к разряду обычных диэлектриков.

5. Одно весьма важное обстоятельство характеризует все перечисленные случаи прохождения электрического тока. В этих случаях может сколь угодно долго наблюдаться *постоянный ток*, хотя бы и очень слабый. Есть, однако, еще такой случай прохождения электрического тока, когда в некотором объеме, лежащем на пути тока, полностью отсутствуют заряды, могущие длительно передвигаться в неизменном направлении. Речь идет о случае совершенного диэлектрика, у которого электрическое сопротивление бесконечно велико. В наиболее чистом виде мы встречаемся с подобными условиями прохождения электрического тока, если в рассматриваемом объеме совершенно нет какой бы то ни было обычной материи и никакие материальные носители электричества не могут здесь появиться извне. Это есть случай так называемой абсолютной „пустоты", т. е. пространства, в котором нет ничего, кроме эфира. Как показывает опыт, совершенный диэлектрик, лежащий на пути тока, вообще говоря, не прерывает его, но только в подобных условиях ток не может сколь угодно долго итти в одном и том же направлении, а возможно длительное существование лишь такого тока, направление которого претерпевает периодические или хотя бы апериодические изменения. Таким образом, сквозь совершенный диэлектрик может проходить *переменный ток*, и ничто не препятствует существованию подобного рода тока в течение сколь угодно большого промежутка времени.

Согласно Максвеллу, мы встречаемся в указанном случае с токами электрического смещения. Всё происходит так, как будто бы здесь мы имеем дело с какой-то „упругой" деформацией диэлектрика, эквивалентной подлинному перемещению электричества. Под влиянием электрической силы, воздействующей на диэлектрик, эта упругая деформация, которую Максвелл назвал *электрическим смещением*, может нарастать в каком-либо определенном направлении лишь до известного предела, соответствующего моменту, когда стремление деформированного диэлектрика вернуться к своему нормальному состоянию полностью уравновесит эффект электрической силы. Ток электрического смещения существует только во время изменения величины электрического смещения. При уменьшении этой величины или при возникновении электрического смещения в обратном направлении и кратковременный ток смещения будет протекать в другую сторону. Следовательно, если величина электрического смещения в некотором диэлектрике будет претерпевать периодические или апериодические изменения, то в этом диэлектрике будет существовать ток электрического смещения.

Принято обозначать через D величину вектора электрического смещения, численно равную количеству электричества, проходящего через единицу поверхности, нормальной к направлению смещения, за время возникновения этой „упругой" деформации. Когда направление вектора электрического смещения сохраняется неизменным, плотность тока смещения δ, протекающего через диэлектрик в каждый данный момент времени, может быть выражена так:

$$\delta = \frac{dD}{dt}.$$

к. Для более углубленного понимания введенного Максвеллом представления о токах электрического смещения и для того, чтобы вполне оценить всё значение этого плодотворного физического представления, которое дало Максвеллу возможность сделать чрезвычайно важные обобщения в области теории электромагнитного поля, считаем небесполезным ознакомиться с подлинными его высказываниями по этому поводу. С этой целью мы приведем ряд цитат из первого тома труда Максвелла „A Treatise on Electricity and Magnetism". В § 60 указанной книги он, между прочим, говорит:

„Электрическая поляризация некоторого элементарного объема диэлектрика есть вынужденное состояние, в которое среда приходит под действием электродвижущей силы и которое исчезает, когда эта сила устраняется. Его возможно представить себе в виде того, что мы можем назвать электрическим смещением, производимым электродвижущей силой. Когда электродвижущая сила действует на проводящую среду, она возбуждает ток сквозь эту среду, если же среда есть непроводник или диэлектрик, такой ток не может длительно протекать через нее, но электричество смещается внутри среды в направлении электродвижущей силы, причем степень этого смещения зависит от величины электродвижущей силы, так что в случае увеличения или уменьшения электродвижущей силы и электрическое смещение возрастает или убывает в том же отношении.

Величина смещения измеряется количеством электричества, которое проходит сквозь единицу поверхности, в то время как смещение возрастает от нуля до действительной его величины. Таким образом, это есть мера электрической поляризации.

Аналогия между действием электродвижущей силы, производящей электрическое смещение, и действием обычной механической силы, производящей смещение в некотором упругом теле, настолько очевидна, что мне представилось возможным назвать отношение электродвижущей силы к соответствующему электрическому смещению *коэффициентом электрической упругости* среды. Этот коэффициент различен для различных средин и изменяется обратно пропорционально диэлектрической постоянной каждой среды.

Изменения электрического смещения, очевидно, представляют собой электрические токи. Эти токи, однако, могут существовать только во время изменения смещения и поэтому не в состоянии продолжаться неопределенно долго в одном направлении подобно токам в проводниках, так как смещение не может превзойти известной величины..."

И далее, в § 62 цитируемой книги, содержатся нижеследующие строки:

„... что́ бы ни представляло собой электричество и что́ бы ни могли мы разуметь под движением электричества, явление, которое мы назвали электрическим смещением, есть движение электричества в том же смысле, как и перенос некоторого определенного количества электричества вдоль проволоки есть какое-то движение электричества; единственное различие состоит лишь в том, что в диэлектрике существует сила, которую мы назвали электрической упругостью, которая противодействует электрическому смещению и вынуждает электричество сдвигаться назад, когда электродвижущая сила устраняется; между тем как в проводящей проволоке электрическая упругость непрерывно уступает, так что появляется ток подлинной проводимости и сопротивление связано зависимостью не с полным

количеством электричества, смещенным из его положения равновесия, а с количеством электричества, которое проходит через поперечное сечение проводника за данный промежуток времени".

В последнем отрывке представляют значительный интерес слова: „...что́ бы ни представляло собой электричество и что́ бы ни могли мы разуметь под движением электричества...". Укажем прежде всего, что Максвелл, конечно, отдавал себе полный отчет в отсутствии каких-либо точных данных касательно того, как необходимо понимать действительную природу физического агента, называемого нами „электричеством". Затем Максвелл несомненно принимал во внимание то обстоятельство, что еще Фарадей пришел к заключению о вероятной ошибочности наших обычных представлений об электрическом токе. В § 46 настоящей Главы VI мы уже имели случай отметить такого рода суждение Фарадея. Здесь, надо полагать, подразумевается достаточно выяснившееся большое значение той стороны процесса электрического тока, которую мы воспринимаем в качестве магнитного поля тока. Итак, свои высказывания по вопросу об электрическом смещении Максвелл хотел поставить вне всякой зависимости от того, „... что́ бы ни представляло собой электричество и что́ бы ни могли мы разуметь под движением электричества...".

г. Еще одно место в самом конце последней цитаты заслуживает особенного внимания. Максвелл, не входя в детальное рассмотрение того, что происходит в обычном проводнике при прохождении электрического тока, ограничивается лишь общим указанием: „...в проводящей проволоке электрическая упругость непрерывно уступает, так что появляется ток подлинной проводимости..." Здесь речь идет о различии между диэлектриками и проводниками. В последних „электрическая упругость непрерывно уступает" действию электродвижущей силы, производящей электрическое смещение. Приведенными немногими словами намечается путь к дальнейшему выяснению некоторых существенных подробностей процесса движения электричества в проводнике. Из этих слов следует, что представление об электрическом смещении Максвелл распространяет на все без исключения материалы. По Максвеллу, электрическое смещение может иметь место не только в совершенных диэлектриках, но также и в так называемых плохих, т. е. полупроводящих, диэлектриках, во всякого рода электролитах и даже в металлах. В совершенном диэлектрике раз возникшее электрическое смещение при сохранении внешних условий, его возбудивших, может неопределенно долго оставаться неизменным, и мы будем иметь

$$D = \text{Const.},$$
$$\delta = \frac{dD}{dt} = 0,$$

так что полностью отсутствует какой бы то ни было электрический ток. При наличии же ионов, электронов и т. п. электрическое смещение будет более или менее быстро исчезать в связи с перемещением указанных элементарных носителей электричества. Для поддержания постоянного тока в таком случае требуется непрерывное возобновление деформации смещения со скоростью, соответствующей быстроте ослабления и, так сказать, разрушения ее в процессе перемещения элементарных носителей электрических зарядов. Во всё время этого возобновления упругой деформации смещения и происходит то, что мы называем электрическим током в проводнике.

Дж. Дж. Томсон сделал попытку развить рассматриваемую точку зрения Максвелла и представить себе возможный механизм ослабления электрического смещения в процессе перемещения ионов, электронов и т. п.[1] Выяснилось, что при установившемся режиме, т. е. в случае постоянного тока, количество электричества, переносимого этими элементарными зарядами через поперечное сечение некоторого проводника, должно быть в точности равно по абсолютной величине возобновляющемуся за то же время полному электрическому смещению сквозь данное сечение проводника. Таким образом, при определении силы проводникового тока в количественном отношении совершенно безразлично, учитываем ли мы движение всех носителей элементарных электрических зарядов, как это обычно и делается, или же принимаем во внимание только непрерывное возобновление полного электрического смещения сквозь рассматриваемое сечение проводника, на что обычно не принято обращать должное внимание.

Если строго придерживаться взглядов Максвелла, то можно утверждать, что *во всех без исключения случаях электрического тока первичное, основное движение электричества вдоль цепи тока осуществляется именно в процессе изменения или возобновления полного электрического смещения сквозь поперечное сечение этой цепи.* Перемещение же разного рода носителей электрических зарядов вдоль цепи является лишь вторичным явлением, которое начинает играть роль в тех случаях, которые мы характеризуем терминами „проводниковый ток" или „ток конвекции".

д. Пуанкаре, излагая теорию Максвелла и касаясь электрического смещения, указывает, что то электричество, которое, согласно этой теории, мы должны представлять себе смещающимся во время установления электрической „упругой" деформации в эфире, т. е. в так называемой „пустоте", представляет собой нечто, отличающееся от обычно рассматриваемого электричества.[2] Быть может, это и так, а быть может, что более вероятно, намечающаяся теперь эволюция наших представлений о природе электрона и других элементарных зарядов приведет к устранению кажущегося различия между двумя видами „электричества". Дело в том, что примитивная электронная теория, отмежевавшаяся от основных идей Фарадея и Максвелла, до последнего времени оперировала с электронами, рассматриваемыми как некоторые элементарные корпускулы строго ограниченного объема, обладающие врожденной способностью взаимодействовать одна с другой на расстоянии, через ничто. С этой точки зрения движущиеся электроны представляют собой, так сказать, точечные токи, отделенные друг от друга. В таком случае не может быть, конечно, и речи о максвелловском принципе непрерывности тока, чему специально посвящен следующий § 63. Но эта примитивная теория начала претерпевать метаморфозу, обнаруживающую здоровые симптомы сближения с фарадее-максвелловской точкой зрения. Именно, как мы указывали уже раньше, в связи с развитием волновой механики, с одной стороны, и на основе экспериментальных данных из области диффракции электронов и иных мельчайших частиц материи, с другой стороны, возникло представление об элементарном электрическом заряде как о некотором центре электромагнитного процесса, происходящего в окружающем пространстве. Таким образом, электрон, протон и т. п. теряют свои резко очерченные границы, как бы расплы-

[1] J. J. Thomson, Recent Researches in Electricity, pp. 45—52.
[2] H. Poincaré. Électricité et Optique, 1901, p. 14.

ваясь в пространство вокруг этих центров и по природе своей сближаются с тем, что вообще может иметь место и, по всей вероятности, действительно имеет место в пространстве, т. е. в основной физической субстанции (в эфире).

Необходимо также принять во внимание следующее. Всё, что было изложено в §§ 58—61 по вопросу о возможной вихревой природе элементарных электрических зарядов, по существу своему вполне гармонирует с общими соображениями Максвелла по поводу „упругой" деформации электрического смещения. Еще Кельвин (В. Томсон) показал, что существование вихревого движения в среде, которая сама по себе не обладает никакой бы то ни было упругостью, должно сообщать этой среде свойства якобы упругого тела. Следовательно, если вихревое движение эфира заполняет некоторый объем пространства, эфир в этом объеме может рассматриваться как среда, способная подвергаться „упругой" деформации. Весьма возможно, сверх того, что углубление в физический смысл идеи Фарадея об электротоническом состоянии, на котором мы останавливались в §§ 54 и 55, будет значительно содействовать дальнейшей эволюции наших представлений об „электричестве" и вообще об электрическом поле.

§ 63. Принцип непрерывности электрического тока

а. Принцип непрерывности электрического тока, установленный Максвеллом, лежит в основе целого ряда важных соотношений, которыми характеризуется электромагнитное поле. Справедливость этого весьма важного положения в полной мере подтверждается всей совокупностью следствий, вытекающих из максвелловой теории и оправдывающихся на опыте.

Когда цепь состоит только из металлического проводника, замкнутость контура тока становится самоочевидной. Постоянный ток может протекать лишь в случае отсутствия каких бы то ни было перерывов в проводниковой цепи. То же наблюдается и тогда, когда цепь включает в себе какие-либо электролиты или промежутки, содержащие ионизированный газ. Если же в металлической цепи есть перерыв, заполненный более или менее совершенным диэлектриком, например если в цепь введен некоторый конденсатор, то постоянный ток не в состоянии проходить по такой цепи и мы обычно называем ее „разомкнутой цепью". Опыт, однако, показывает, что переменный ток по этой цепи может протекать. Надо полагать, что и подобного рода цепь по существу является замкнутой, хотя на первый взгляд она и кажется прерванной. Представление об электрическом смещении позволяет разобраться в том, как в данном случае осуществляется непрерывность тока, который всегда и безусловно всегда течет вдоль вполне замкнутого контура и никогда нигде не претерпевает разрыва.

б. Основные соображения Максвелла, касающиеся принципа непрерывности электрического тока, содержатся в том же разделе его „Трактата об электричестве и магнитизме" (A Treatise on Electricity and Magnetism), выдержки из которого мы уже приводили в предыдущем параграфе, когда рассматривали вопрос о деформации электрического смещения. В § 60 указанного трактата, непосредственно после слов, разъясняющих процесс возникновения электрического смещения в пространстве вокруг положительно заряженного шара, Максвелл говорит:

„Смещение изнутри наружу сквозь какую-либо сферическую поверхность, концентрическую с шаром, равно заряду шара.

Для того чтобы закрепить наши представления об электрическом смещении, рассмотрим некоторый конденсатор, образованный двумя проводящими пластинами A и B, разделенными слоем диэлектрика C. Пусть W есть проводящая проволока, соединяющая A и B, и предположим, что под действием какой-либо электродвижущей силы количество Q положительного электричества переносится вдоль проволоки от B к A. Положительная электризация A и отрицательная электризация B обусловят возникновение определенной электродвижущей силы, действующей в диэлектрическом слое по направлению от A к B, и она произведет электрическое смещение от A к B внутри диэлектрика. Величина этого смещения, которое измеряется количеством электричества, вынужденного пройти через некоторое воображаемое сечение диэлектрика, делящее его на два слоя, будет согласно нашей теории, в точности равна Q...

Выходит, таким образом, что в то время, когда количество электричества Q переносится вдоль проволоки под действием электродвижущей силы по направлению от B к A и проходит при этом сквозь каждое поперечное сечение данной проволоки, такое же количество электричества проходит сквозь каждое поперечное сечение диэлектрика от A к B вследствие электрического смещения.

Движение электричества будет обратным во время разряда конденсатора. В проволоке разряд Q пройдет от A к B, а в диэлектрике смещение будет ослабевать, и количество электричества Q протечет сквозь любое сечение диэлектрика от B к A.

Каждый случай заряжения или разряда может быть поэтому рассматриваем как некоторое движение в замкнутой цепи, так что через всякое сечение цепи в течение одного и того же промежутка времени протекает одно и то же количество электричества, и это происходит не только в проводниковой цепи, что всегда признавалось, но и в тех случаях, когда вообще предполагали, что электричество аккумулируется в определенных местах".

В следующем § 61 своего трактата Максвелл продолжает:

„Мы, таким образом, приходим к весьма замечательному следствию, вытекающему из теории, которую исследуем, а именно, что движение электричества сходно с движением некоторой *несжимаемой* жидкости, так что полное количество в воображаемой фиксированной замкнутой поверхности остается всегда одним и тем же. Этот результат на первый взгляд кажется стоящим в прямом противоречии с тем фактом, что мы можем зарядить какой-либо проводник, а затем внести его в замкнутое пространство и таким путем изменить количество электричества внутри этого пространства. Однако мы должны помнить, что обычная теория вовсе не считается с электрическим смещением в веществе диэлектрика, рассмотренным нами, но сосредоточивает свое внимание на электризации поверхностей, которыми граничат проводники с диэлектриками. В случае заряженного проводника предположим, что заряд будет положительным, тогда, если окружающий диэлектрик распространяется во все стороны за пределы замкнутой поверхности, будет иметь место электрическая поляризация, сопровождаемая смещением изнутри наружу по всей замкнутой поверхности, и поверхностный интеграл смещения, распространенный по всей поверхности, будет равен заряду проводника внутри.

Таким образом, когда заряженный проводник вносится в замк-

нутое пространство, тотчас же возникает смещение количества электричества, равного заряду, изнутри наружу сквозь ограничивающую поверхность, причем полное количество внутри поверхности остается одним и тем же".

И, наконец, в § 62 своего трактата Максвелл в следующих словах окончательно формулирует принцип непрерывности электрического тока:

„... в каждом случае движение электричества подчиняется тем же условиям, как и движение несжимаемой жидкости, именно — в любой промежуток времени из некоторого данного замкнутого пространства должно вытекать как раз столько, сколько втекает в него.

Из этого следует, что всякий электрический ток должен образовывать замкнутую цепь. Важность этого результата выяснится, когда мы будем исследовать законы электромагнитизма".

в. Математическую формулировку принципа непрерывности электрического тока можно представить в таком виде:

$$\oint_S \delta \cos \varkappa \, ds = 0,$$

где δ есть плотность тока (независимо от рода этого тока) в некоторой точке произвольной замкнутой поверхности S, $\varkappa$ — угол между вектором тока и внешней нормалью к поверхности в данной точке, а интегрирование производится по всей этой замкнутой поверхности. Следовательно, полный ток сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю. Иными словами, сила тока, протекающего сквозь некоторые участки произвольно взятой замкнутой поверхности в направлении изнутри наружу, в точности равна силе тока, протекающего сквозь другие участки той же поверхности в обратном направлении, т. е. снаружи внутрь.

Отметим, что с формальной стороны принцип непрерывности электрического тока выражается совершенно так же, как и принцип непрерывности магнитного потока (см. § 17 Главы III настоящей книги):

$$\oint_S B \cos \varkappa \, ds = 0.$$

г. Итак, всякий электрический ток протекает по непрерывному, вполне замкнутому контуру. Сопоставляя это чрезвычайно важное обстоятельство с принципом непрерывности магнитного потока, заключаем, что магнитный поток самоиндукции и сопряженный с ним электрический ток геометрически связаны между собой подобно двум смежным звеньям обыкновенной цепи.

Можно утверждать, что в электромагнитном процессе, обычно называемом „электрическим током", основная роль контура тока состоит главным образом в охвате и связывании потока самоиндукции, отдельные составляющие которого, т. е. магнитные линии, стремятся раздвинуться вследствие бокового распора и распространиться по всему окружающему пространству. Контур тока представляет собой, так сказать, обруч, стягивающий пучок магнитных линий потока самоиндукции и ограничивающий область их распространения. То движение электричества, которое мы всегда констатируем в том или ином контуре тока, именно делает этот контур в известной мере непроницаемым для магнитных линий и сообщает ему способность выполнять роль указанного обруча, как бы фиксирующего поток самоиндукции.

§ 64. Возникновение потока самоиндукции

а. Предыдущий параграф мы закончили, отметив тот факт, что поток самоиндукции и соответствующий ему непрерывный контур тока теснейшим образом взаимно связаны. В § 53 настоящей Главы при рассмотрении эквивалентного сверхпроводника и далее в § 55, посвященном электротоническому состоянию как основному свойству магнитного потока, мы стремились выяснить и, надо полагать, до некоторой степени выяснили ряд существенных обстоятельств, непосредственно относящихся к природе электрического тока и к принципу непрерывности тока. Во всех случаях, когда речь идет о некоторой трубке магнитной индукции произвольного поперечного сечения или же об элементарной трубке магнитной индукции, т. е. о реальной магнитной линии, самое представление о составляющих магнитного потока должно быть ассоциируемо со специфическим процессом, имеющим характер какого-то особого „электрического тока", который со всех сторон обтекает каждую трубку магнитной индукции совершенно независимо от наличия каких-либо проводящих ток цепей. Это, надо полагать, находится в самой тесной связи с вихревой природой магнитного потока, иными словами, с тем, что физически существующие магнитные линии являются вихревыми нитями. Любой пучок магнитных линий потока самоиндукции, в совокупности представляющих собой некоторую трубку магнитной индукции, не может быть мыслим без обтекающего эту трубку особого „электрического тока", который как бы образуется благодаря согласованности направления элементарных „токов", органически связанных со структурой каждой отдельной магнитной линии. Движение электричества, происходящее во всяком обычном контуре тока, необходимо поэтому трактовать в качестве процесса, непосредственно определяемого природой магнитного потока, а не как нечто, могущее осуществляться само по себе без какого-либо соподчинения тому, что происходит в пространстве, охватываемом контуром тока, т. е. там, где находится поток самоиндукции. Таким образом, совершенно очевидно, что с рассматриваемой точки зрения электрический ток, идущий по замкнутой проводящей цепи, представляет собой лишь своего рода внешнее проявление внутренних вихревых движений, в скрытом виде уже существующих во всяком магнитном потоке.

Момент возникновения потока самоиндукции есть вместе с тем момент, когда так или иначе начинает обнаруживаться электрический ток в некотором контуре, как обруч охватывающем этот поток. Остановимся на кратком рассмотрении главнейших случаев возникновения потока самоиндукции.

б. Мы уже касались вопроса о вероятном механизме электромагнитной индукции тока (см., например, § 32 Главы IV). Было разъяснено, что появляющийся при этом поток самоиндукции можно, вообще говоря, понимать в качестве результата соответствующих преобразований внешнего магнитного потока, сопровождающихся отпочкованием магнитных звеньев, которые нанизываются на контур индуктированного тока. Всё сказанное по этому поводу можем дополнить следующими соображениями.

Представим себе замкнутый проводящий контур, состоящий, например, из металлической проволоки, некоторый участок которой движется поперек внешнего магнитного потока, пересекая его по схеме, рассмотренной в § 32 Главы IV (рис. 88—90). Весь возникающий в таком слу-

чае поток самоиндукции индуктированного тока, сцепляющийся с данным контуром, состоит исключительно из магнитных звеньев, отпочкованных в генераторном процессе от главного (внешнего) магнитного потока. Действительно, уравнение электродвижущих сил для этого простейшего случая можно написать так:

$$ri + \frac{d(Li)}{dt} = \frac{d\theta}{dt},$$

где θ есть число магнитных звеньев, нанизывающихся на проводник (см. § 36 Главы IV) и r — электрическое сопротивление цепи. Отсюда путем интегрирования получаем:

$$rq + Li = \Delta\theta,$$

где q есть количество электричества, протекшего по цепи за время пересечения внешнего магнитного потока и возникновения потока самоиндукции Li, а через $\Delta\theta$ обозначено полное количество магнитных звеньев, которые нанизались на контур проводника за тот же промежуток времени. Имеем, следовательно,

$$Li = \Delta\theta - rq.$$

Принимая во внимание, что $\Delta\theta$ и rq всегда бывают одного и того же знака, можем написать

$$Li \leqslant \Delta\theta.$$

Ясно, таким образом, что величина потока самоиндукции (Li) ни в коем случае не превышает количества магнитных звеньев ($\Delta\theta$), возникших в процессе генерирования индуктированного тока.

В обычных проводниковых цепях, когда r не равно нулю, а часть магнитных звеньев, равная rq, успевает уже поглотиться веществом проводника и отдать ему несомую ими энергию, проявляющуюся в форме джоулева тепла (см. § 58), мы постоянно будем иметь

$$Li < \Delta\theta.$$

В предельном же случае, когда $r = 0$, получаем

$$Li = \Delta\theta.$$

На содержании этого последнего соотношения мы останавливали внимание раньше, когда рассматривали вопрос о сверхпроводящих цепях и указывали, что в подобного рода цепях поток самоиндукции никак не расходуется и, раз образовавшись, сохраняется неизменным, как бы скованный замкнутым сверхпроводящим контуром.

в. Представляют значительный интерес случаи возникновения потока самоиндукции в цепях, в которых электрический ток появляется и поддерживается не вследствие электромагнитной индукции, а по причине существования электродвижущих сил какого-либо иного происхождения. Рассмотрим, например, случай термоэлектрического тока.

Анализ условий образования джоулева тепла в проводнике привел нас к необходимости признать большую вероятность того, что магнитные звенья потока самоиндукции, поглощаясь веществом проводника, прео-

бразуются там в элементарные электрические заряды, в основном, надо полагать, в электроны, и что такого рода преобразования вообще возможны в природе (§§ 58—61). Должен быть, конечно, мыслим и процесс обратного преобразования, когда, например, упорядоченно и однородно движущиеся элементарные магнитные вихри-электроны, входящие в состав более или менее значительной группы их, будут претерпевать взаимное сращивание и слияние по схеме, иллюстрированной рис. 71—74 (§ 29, Глава IV). В таком случае указанная группа вихревых электронов будет преобразовываться в одно результирующее магнитное звено макроскопических размеров, входящее в число магнитных линий потока самоиндукции и охватывающее проводник, внутри которого происходит описываемый процесс обратного преобразования.

Обращаясь теперь к термоэлектрическим цепям, можно высказать предположение, что в местах спаев как раз должны образовываться группы магнитных вихрей-электронов, которые все располагаются в одной плоскости в непосредственной близости один к другому. Именно здесь и мыслимо начало указанного их сращивания в магнитные вихри макроскопических размеров, входящие в состав потока самоиндукции замкнутой термоэлектрической цепи. Это преобразование магнитных вихрей-электронов в магнитные линии потока самоиндукции должно начинаться одновременно с моментом, когда электроны приходят в упорядоченное и однообразное движение вдоль всей замкнутой цепи и когда они отходят от более или менее связывающего их двойного электрического слоя в месте спая. Мы говорим: в термоэлектрической цепи возникает ток со всеми вообще присущими ему свойствами, из которых на первом месте стоит поток самоиндукции.

Совершенно аналогичным образом следует представлять себе и образование потока самоиндукции в случае цепи, в которой действует электродвижущая сила какого-либо гальванического элемента, а также в случае, когда в обычной несверхпроводящей цепи индуктируется столь слабый ток, что процесс отпочкования магнитных звеньев от внешнего потока не доходит до конца.

Итак, во всех этих случаях (термоэлектрический ток, ток в цепи гальванических элементов) возникновение потока самоиндукции можно рассматривать как результат процесса, который в основном должен быть относим к области преобразований магнитного потока за счет элементарных магнитных потоков, уже существующих в объеме всякого проводника.

г. Повидимому, как-то иначе надо понимать обстоятельства, сопровождающие возникновение магнитного потока в том особенном случае, когда в пространстве, в котором он появляется, мы обычно не усматриваем наличия каких-либо микрофизических магнитных потоков в форме вихревых электронов или иных элементарных электрических зарядов. Речь идет о магнитном поле, немедленно обнаруживающемся в объеме, где начинает перемещаться электрическое поле, которое предварительно здесь уже существовало. Это может иметь место и в так называемой абсолютной „пустоте“, т. е. в эфире. Следует подчеркнуть, что и в рассматриваемом случае магнитные линии постоянно образуют замкнутые контуры. Так должно быть ввиду непреложности и универсальности принципа непрерывности магнитного потока, но этому обычно не уделяется должного внимания. При подробном же рассмотрении данного случая всегда можно убедиться в том, что возникающий магнитный поток обязательно сцепляется с контуром электрического тока (в этом случае — тока электрического смещения). Сказанное, конечно, вытекает

и из закона магнитодвижущей силы. Таким образом, магнитный поток, возникающий при движении какого бы то ни было электрического поля, с полным основанием мы можем трактовать в качестве потока самоиндукции, связанного с тем или иным током смещения.

Дж. Дж. Томсон при объяснении различных случаев возникновения магнитного поля пошел по пути, в значительной степени расходящемуся с прямыми и ясными указаниями Фарадея, который, как мы неоднократно уже отмечали, в конце концов пришел к убеждению, что магнитные линии физически существуют. Согласно же Дж. Дж. Томсону, то, что мы обычно называем магнитным полем, не есть вполне самостоятельная физическая реальность, а представляет собой лишь способ нашего восприятия всякого движения электрического поля или, точнее сказать, движения элементарных трубок электрического смещения, для которых он предложил термин „фарадеевские трубки".[1] По Дж. Дж. Томсону, именно движение фарадеевских трубок лежит в основе всех электромагнитных процессов, в том числе и процессов, именуемых электрическими токами.

Мы не будем здесь останавливаться на более подробном рассмотрении этих общих установок Дж. Дж. Томсона. Мы коснемся данного вопроса в §§ 65 и 66. Теперь же ограничимся указанием, что обе физические реальности — электрическое поле и магнитное поле — по природе своей несомненно должны находиться в самой тесной связи между собой. Это утверждение вытекает, между прочим, из ряда высказываний Фарадея, заключающихся в тех разделах его „Опытных исследований по электричеству", в которых он затрагивал вопрос об электротоническом состоянии.

Если электрическое поле и магнитное поле не представляют собой каких-либо совершенно обособленных физических явлений, не имеющих в основе чего-то общего, если природа того и другого физического явления в действительности одна и та же, иными словами, если оба эти явления должны быть рассматриваемы лишь как различные формы одного и того же основного движения материи (по всей вероятности, вихревого), в таком случае возникновение магнитного поля при движении электрического поля может быть понимаемо как результат некоторого специфического преобразования электрического поля в магнитное. Весьма вероятно, что подобного рода преобразования вообще имеют место в ряде случаев, когда электромагнитный процесс (электрический ток) возникает в какой-либо системе, в которой первоначально существовало только электрическое поле. Так, при разомкнутой цепи гальванического элемента тока еще нет, но существует электрическое поле между полюсами элемента. При замыкании цепи появляется поток самоиндукции. Помимо указанного выше слияния элементарных магнитных потоков (в форме, например, вихревых электронов) в магнитные линии макроскопических размеров, повидимому, должно происходить и преобразование электрического поля в магнитное. Это особенно важно учитывать при рассмотрении начальной стадии возникновения электрического тока и соответствующего потока самоиндукции. Сказанное имеет прямое отношение также к некоторым условиям, в которых может протекать явление электромагнитной индукции, причем здесь мыслимо и преобразование магнитного поля в электрическое. В § 32 Главы IV мы уже отмечали, что общая схема отпочкования магнитных звеньев в процессе электромагнитной индукции тока безусловно должна пол-

[1] J. J. Thomson. Recent Researches in Electricity, pp. 28—43.

ностью осуществляться при достаточной силе тока в цепи, но в случае разомкнутой цепи генератора (динамомашины) или при недостаточной силе тока процесс отпочкования магнитных звеньев от главного потока может, так сказать, недоразвиться до конца и ограничивается образованием электрического поля между проводами, присоединенными к зажимам генератора. При замыкании же цепи, а также при возникновении потока самоиндукции в случае слабого тока или в начальной стадии перехода к более сильному току, повидимому, происходит обратное преобразование электрического поля в магнитное. Этих взаимных преобразований магнитного и электрического полей мы отчасти коснемся еще в § 66.

§ 65. Электромагнитное поле. Электромагнитная энергия

а. Во всякой сверхпроводящей цепи, в которой был как-либо возбужден электрический ток и которая затем предоставлена самой себе, так что режим тока может рассматриваться как установившийся, единственным внешним признаком происходящего процесса, как мы уже неоднократно указывали, является магнитный поток самоиндукции. В этом случае электрический потенциал всех точек сверхпроводящей цепи будет один и тот же. Следовательно, разность потенциалов между любыми двумя точками цепи равна нулю:

$$U_1 - U_2 = 0.$$

В пространстве вокруг этого сверхпроводника с током электрическое поле полностью отсутствует, т. е. будем иметь:

$$E = 0.$$

Допустим теперь, что некоторый участок AB данной цепи теряет свойство сверхпроводимости и величина электрического сопротивления r этого участка приобретает конечное значение:

$$r \neq 0.$$

В таком случае немедленно нарушается установившийся режим в цепи. Запасенная в ней электрокинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2} Li^2$$

начнет расходоваться на участке AB, превращаясь в джоулево тепло. Между точками A и B появляется разность потенциалов

$$U_A - U_B = ri \neq 0$$

и в пространстве, окружающем все части цепи, обнаруживается электрическое поле, т. е. во всех точках этого пространства будет

$$E \neq 0.$$

Здесь же существует и основное магнитное поле. Следовательно, имеем

$$H \neq 0.$$

Возникновение электрического поля в этом случае по времени совпадает с моментом начала движения магнитных линий потока самоиндукции, устремляющихся в вещество проводника, утратившего свойство сверхпроводимости (см. § 58).

Пространство, в котором сосуществуют электрическое поле и магнитное поле, органически связанные одно с другим, называется *электромагнитным полем.*

Необходимо особо подчеркнуть, что в рассматриваемых условиях магнитное поле и электрическое поле должны быть понимаемы как две стороны некоторого единого электромагнитного процесса, происходящего в пространстве. С подобным же соотношением между обоими указанными полями, помимо случая обычной цепи электрического тока, мы встречаемся, как известно, и в ряде других случаев (например, электромагнитное излучение, поле вокруг движущегося электрического заряда).

Это одновременное существование в данной части пространства электрического и магнитного полей, как основной признак электромагнитного поля, не следует понимать в смысле простого наложения друг на друга указанных двух полей. Создав, например, в одном и том же объеме, с одной стороны, магнитное поле с помощью некоторого постоянного магнита, и в то же время, с другой стороны, электрическое поле от какого-либо заряженного тела, в результате подобного наложения магнитного и электрического полей мы не получим того, что выше было названо электромагнитным полем, хотя бы даже оба поля были ориентированы перпендикулярно одно по отношению к другому. Одновременное существование двух полей будет тут чисто случайным фактом: величины электрической силы и магнитной силы (E и H) совершенно не зависят одна от другой и могут быть произвольно заданы. Иногда, однако, делаются попытки трактовать в качестве „электромагнитного поля" всякое наложение электрического поля на магнитное, т. е. всякое их сосуществование, хотя бы чисто случайное. Мы считаем всё же более правильным пользоваться термином „электромагнитное поле" только при условии, что можно усмотреть тесную связь между обоими полями, электрическим и магнитным. Связь эта должна прежде всего выражаться в том, что при исчезновении одного из указанных полей (магнитного или электрического) или при прекращении его пространственного перемещения — немедленно перестает существовать другое поле (соответственно, электрическое или магнитное).

б. Итак, в случае тока, проходящего по обычному проводнику с конечным сопротивлением ($r \neq 0$), мы встречаемся с электромагнитным полем, возникновение которого с точки зрения, проводимой в настоящей книге, необходимо связывать с движением магнитных линий потока самоиндукции, начинающих непрерывно поглощаться веществом проводника в процессе образования джоулева тепла. В случае же установившегося режима постоянного тока в сверхпроводящей цепи ($r = 0$) совершенно отсутствует подобного рода движение магнитных звеньев, отсутствует также электрическое поле и не может быть речи об электромагнитном поле в обычном понимании этого термина.

В предыдущем § 64 было уже упомянуто о точке зрения Дж. Дж. Томсона, согласно которой то, что мы называем магнитным полем и магнитным потоком, не существует как самостоятельная физическая реальность. Всё это есть якобы лишь форма нашего восприятия движения фарадеевских трубок (элементарных трубок электрического смещения). В целом ряде случаев такая точка зрения может показаться весьма

приемлемой. Тот особенный случай, когда в некотором пространстве наблюдается одно только магнитное поле, электрическое же поле, явно выраженное, отсутствует, по Дж. Дж. Томсону объясняется наличием встречного движения противоположно направленных фарадеевских трубок, так что средняя величина электрического смещения D будет равна нулю и соответственно этому всё происходит так, как будто бы в каждой точке пространства имеем

$$E=0,$$
$$H\neq 0.$$

Если и мыслимо без особо больших натяжек трактовать таким образом магнитное поле в некоторых условиях, то в отношении сверхпроводящих цепей проведение точки зрения Дж. Дж. Томсона встречает непреодолимые затруднения.

Следует отметить прежде всего, что самая идея о встречном движении фарадеевских трубок весьма неправдоподобна. Трудно себе представить, чтобы противоположно направленные фарадеевские трубки могли существовать раздельно в условиях их тесного сближения и чтобы при этом между ними не имело места взаимодействие, аналогичное преобразованиям, которые были рассмотрены применительно к магнитному потоку (см. §§ 25—29 Главы IV). Это тем более неправдоподобно, что Дж. Дж. Томсон отождествляет элементарные фарадеевские трубки с вихревыми нитями, между тем как непосредственный опыт (§ 29) свидетельствует о неминуемом сращивании и слиянии макроскопических вихревых нитей в случае сближения их противоположно направленных участков. Трудно допустить, чтобы вихревые нити микрофизического сечения при каких-то условиях могли вести себя в этом отношении совершенно иначе, и нет никаких оснований для подобного допущения. Кроме того, повторяем (см. § 5 Главы I), что Дж. Дж. Томсон недостаточно учитывал полученный Гельмгольцем результат анализа свойств вихревых нитей в безграничной идеальной жидкости, т. е. в жидкости без внутреннего трения, каковой мы должны считать эфир. Как известно, Гельмгольц показал, что такого рода вихревые нити всегда и безусловно всегда образуют принципиально замкнутые контуры. Фарадеевские же трубки Дж. Дж. Томсона могут обрываться, заканчиваясь на электрических зарядах или исходя из них. Следовательно, если и можно усмотреть некоторые основания для того, чтобы связывать природу электрического поля с вихревым движением, то во всяком случае здесь приходится иметь в виду какую-то более сложную вихревую структуру элементарных составляющих электрического поля (фарадеевских трубок), а нельзя просто отождествлять фарадеевские трубки с вихревыми нитями в эфире, как это вытекает из всех рассуждений Дж. Дж. Томсона.

Обратимся теперь к рассмотрению магнитного поля в случае тока в сверхпроводнике. При последовательном проведении точки зрения Дж. Дж. Томсона самое главное затруднение заключается в том, что всякая фарадеевская трубка, если она связана с каким-либо проводящим ток контуром, нормально должна опираться на него обоими своими концами. Концы же фарадеевской трубки ассоциируются с положительными и отрицательными зарядами и между ними обязательно будет некоторая конечная разность потенциалов, так как на всем протяжении фарадеевской трубки продольные составляющие электрической силы всегда направлены в одну и ту же сторону. Однако, *все точки сверх-*

проводника при установившемся режиме постоянного тока имеют один и тот же электрический потенциал. О каких же движущихся фарадеевских трубках может итти речь в случае, например, простейшего сверхпроводящего контура (рис. 171), охватывающего соответствующий поток самоиндукции Φ_s? Как может существовать некоторая фарадеевская трубка, опирающаяся обоими концами на контур тока i, при условии равенства потенциалов ее начала и конца? Возможно, конечно, попытаться сделать допущение, что противоположно направленные и совершающие встречное движение фарадеевские трубки опираются на рассматриваемый сверхпроводящий контур лишь одними концами, другие же их концы находятся где-то вдали от этого контура. Ошибочность подобного предположения и вообще необоснованность точки зрения Дж. Дж. Томсона выявляются еще более отчетливо при рассмотрении особенных случаев прохождения тока по сверхпроводникам (§ 53). Напомним случай эквивалентного сверхпроводника в форме полого тора T (рис. 172), в объеме которого магнитный поток может

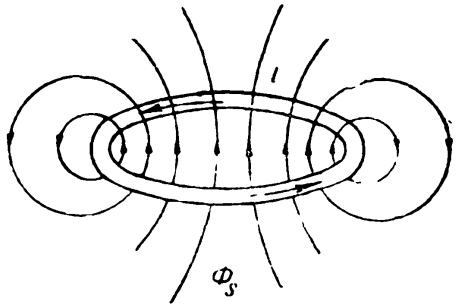


Рис. 171.

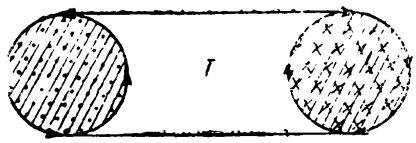


Рис. 172.

быть зафиксирован так, чтобы магнитные линии этого потока не выходили наружу и нигде не пересекали поверхности тора. Условия возникновения подобного магнитного потока были подробно разобраны в § 53 (см. рис. 144 и 145). По всей поверхности сверхпроводящего полого тора T в этом случае будет проходить ток, полностью охватывающий указанный магнитный поток, который по существу является потоком самоиндукции возникшего индуктированного тока. При этом в пространстве вокруг тора может совершенно отсутствовать какое бы то ни было магнитное поле. Рассуждая по Дж. Дж. Томсону, мы должны будем признать, что движущиеся фарадеевские трубки полностью находятся только в объеме полого тора T и потому каждая из них обязательно опирается обоими своими концами на поверхность, ограничивающую тор. Однако это физически невозможно, так как все точки сверхпроводящего тора при неизменных общих условиях должны обладать одним и тем же электрическим потенциалом. Таким образом, в разбираемом примере эквивалентного сверхпроводника невозможно как-либо представить себе встречное движение противоположно направленных фарадеевских трубок. Следовательно, *точка зрения Дж. Дж. Томсона, относящаяся к вопросу о природе магнитного поля, не может быть признана соответствующей действительности.* Вместе с тем лишний раз доказывается правдоподобность точки зрения, проводимой в настоящей книге и утверждающей, что магнитный поток есть подлинная и самодовлеющая физическая реальность.

В качестве добавочной иллюстрации того, насколько неприемлема основная установка Дж. Дж. Томсона в отношении магнитного поля, укажем еще на схему параллельного соединения двух сверхпроводящих ветвей (рис. 173), из которых одна *1* может быть сколь угодно длин-

ной, а другая 2 — сколь угодно короткой, т. е. образующей короткое замыкание между точками A и B. Этот именно случай был разобран в § 56 (см. рис. 157). Мы там показали, что, в отличие от обычных условий разветвления тока, здесь ток i_0 может не претерпевать никакого разделения в точке A, проходя полностью по длинной сверхпроводящей ветви 1, и мы будем иметь

$$i_1 = i_0.$$

Ток же в короткой сверхпроводящей ветви 2 при этом может совершенно отсутствовать, так что

$$i_2 = 0.$$

Спрашивается: почему концы фарадеевских трубок не могут в этом случае скользить по поверхности сверхпроводника 2, соединяющего накоротко точки A и B, иными словами, почему ток не идет от A к B по кратчайшему пути? Ведь фарадеевские трубки, по Дж. Дж. Томсону, могут беспрепятственно скользить своими концами вдоль всякого проводника. Что же запрещает фарадеевским трубкам двигаться в пространстве вокруг короткого сверхпроводника AB так, чтобы при этом возникало магнитное поле, охватывающее ветвь 2? Совершенно непонятно, почему не происходит этого в данном случае. Ясно, следовательно, что движение электричества вдоль короткого сверхпроводящего пути AB и предполагаемое Дж. Дж. Томсоном движение фарадеевских трубок, надлежащим образом ориентированное вокруг этого пути AB, ни в какой степени не зависит от того, насколько данный участок цепи способен проводить „электричество". Возможность течения „электричества" вдоль короткого сверхпроводника AB (2), как видим, полностью подчиняется условиям общего распределения потока самоиндукции в рассматриваемой сложной цепи. На это обстоятельство мы уже обращали внимание в § 56.

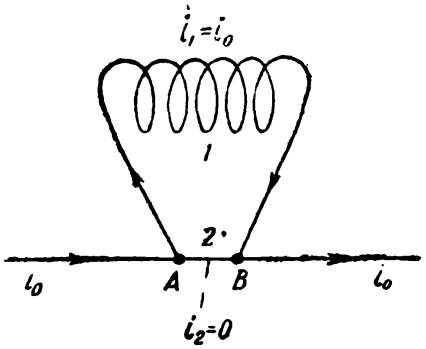


Рис. 173.

Итак, *точка зрения Дж. Дж. Томсона не может послужить основанием для построения общих представлений о природе электромагнитного поля.*

в. Во всяком случае необходимо считаться с тем обстоятельством, что электрическое поле, повидимому, представляет собой подлинную физическую реальность не в меньшей степени, чем магнитное поле. На основании всего, изложенного выше, мы приходим к заключению, что было бы ошибочно пытаться трактовать электромагнитное поле, как-либо игнорируя или недооценивая одну из указанных двух физических реальностей. Вообще же электрическое поле и магнитное поле не следует рассматривать как совершенно различные категории явлений. По всей вероятности, мы имеем в указанных, казалось бы, столь обособленных группах явлений лишь две стороны одного, единого в своей сущности, процесса. В зависимости от условий, в которых развивается этот процесс, мы иногда воспринимаем более отчетливо ту или иную форму его проявления. Весьма часто бывает так, что в данной точке пространства, в данном элементе объема имеющимися в нашем распоряжении средствами удается констатировать наличие лишь одной из форм прояв-

ления *электромагнитного процесса* при видимом отсутствии другой. Однако это нисколько не противоречит признанию их внутреннего единства, мысль о котором именно и привела Фарадея к представлению об электротоническом состоянии среды (§ 54). Может оказаться, что отчетливо наблюдается только магнитное поле или только электрическое поле. Внимательное же обследование этих явлений неизбежно приводит нас к утверждению, что они тесно связаны одно с другим и обычно имеют непосредственное отношение к основному электромагнитному процессу, который происходит в какой-либо части рассматриваемой системы, где явно сосуществуют электрическое и магнитное поля, органически связанные между собой.

Принимая во внимание всё сказанное, можем дать следующее определение электромагнитного поля:

Электромагнитным полем называется пространство, в котором одновременно существуют и электрическое поле и магнитное поле как внутренне связанные и необходимо сопровождающие друг друга проявления единого процесса.

г. Помимо указанных одновременности и взаимной связанности электрического и магнитного полей, как двух сторон некоторого единого процесса, происходящего в пространстве, электромагнитное поле обладает еще одним чрезвычайно важным свойством.

В предыдущих Главах и в настоящей Главе уже достаточно говорилось о кинетической природе магнитного поля, т. е. о том, что в нем совершается какое-то специфическое движение. Однако внешне, как таковое, это движение ничем не обнаруживается. Проявления магнитного поля в общем не сопровождаются ничем таким, что мешало бы формальному рассмотрению данного поля в качестве особого статического состояния среды. Это же можно сказать и относительно электрического поля.

Иначе обстоит дело в случае электромагнитного поля. В этом случае не подлежит никакому сомнению наличие некоторого движения. Здесь имеет место явное развитие и распространение в пространстве процесса, который протекает в электромагнитном поле. Мы не можем создать электромагнитное поле без того, чтобы это состояние среды не начало немедленно так или иначе распространяться в другие части пространства. Электромагнитное поле есть процесс, вообще говоря, непрерывно распространяющийся, и именно процесс, принципиально связанный с непрерывным же движением *электромагнитной энергии*. Затратив в данном месте некоторое количество энергии на создание электромагнитного поля, мы немедленно же можем обнаружить движение этой энергии, преобразованной в электромагнитную форму, по какому-либо одному направлению или по всем направлениям в окружающем пространстве в зависимости от наличных условий. Сказанное непосредственно вытекает из максвелловых дифференциальных уравнений электромагнитного поля и доказывается всей совокупностью опытных данных, относящихся к передаче электромагнитной энергии (по проводам и без них). Рассматриваемое свойство электромагнитного поля является основным и вместе с тем практически весьма ценным.

д. Движение электромагнитной энергии в среде однородной и изотропной происходит в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой лежат векторы E и H (электрической силы и магнитной силы). В количественном отношении рассматриваемое движение энергии определяется так называемым *вектором Пойнтинга*. Физический смысл вектора Пойнтинга заключается в том, что он выражает собой *мощность*

потока электромагнитной энергии, отнесенную к единице поверхности, нормальной к направлению распространения энергии.

Для обозначения вектора Пойнтинга принята буква S. Величина его выражается следующим соотношением:

$$S = EH.$$

Направление вектора Пойнтинга получается из направления вектора H путем поворота его вправо вокруг вектора E как оси (рис. 174).

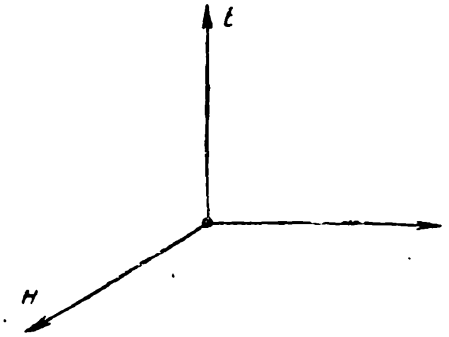


Рис. 174.

Как известно, Пойнтинг вывел указанное соотношение, исходя из максвелловых дифференциальных уравнений электромагнитного поля, для случая *свободного* распространения данного поля. Вместе с тем, однако, он сам отмечает следующее обстоятельство. Вид этого выражения подсказывает мысль, что оно представляет собой общий закон движения электромагнитной энергии, иными словами, что оно приложимо и в тех случаях, когда мы имеем дело с *несвободным* движением такого рода энергии. В справедливости этого заключения мы убедимся в следующем § 66 при рассмотрении вопроса о движении энергии в цепи тока, протекающего по обычному проводнику, наличие которого известным образом ограничивает область распространения электромагнитной энергии и связывает этот процесс.

Всё, что известно об электромагнитной энергии, дает достаточные основания для того, чтобы высказать некоторое предположение о сущности ее. Надо думать, что она не является чем-то принципиально отличающимся от энергии магнитного поля и энергии электрического поля. Действительно, электромагнитная энергия количественно выражается суммой двух названных энергий. Замечательно то, что оба эти слагаемые оказываются равными одно другому. Пойнтинг выяснил, что дело обстоит именно так для случая свободного распространения электромагнитного поля. Повидимому, подобное же соотношение сохраняется во всех вообще случаях движения электромагнитной энергии (см., например, следующий § 66).

Далее необходимо учитывать следующее. Мы уже говорили, что магнитный поток является носителем некоторого количества движения, т. е. что ему свойственна инерция (§§ 47—49). На основании этого можно заключить, что движущиеся магнитные линии должны обладать еще энергией, обусловленной именно их пространственными перемещениями. Надо полагать, что энергия возникающего при этом электрического поля находится в простом соотношении с энергией движения магнитных линий и эквивалентна ей. Всё это, конечно, может быть полностью выяснено только после того, как будет более или менее достоверно установлена подлинная природа электромагнитного поля.

Мы знаем, что при свободном распространении электромагнитного поля в „пустоте“ (в эфире) скорость движения несомой им энергии равна скорости света ($3 \cdot 10^{10}$ см/сек). При несвободном же распространении электромагнитного поля эта скорость, в зависимости от общих условий, может быть и значительно меньше скорости света. Сказанное достаточно отчетливо вытекает из самых элементарных рассуждений.

Представим себе, например, некоторую сверхпроводящую цепь, по которой идет ток i. Полный запас энергии в рассматриваемой системе равен энергии потока самоиндукции Li и выражается электрокинетической энергией тока i

$$T_e = \frac{1}{2} Li^2.$$

Допустим теперь, что данная цепь теряет свойство сверхпроводимости. Поток самоиндукции немедленно начнет убывать и несомая им энергия в конце концов совершенно поглотится проводником цепи, превращаясь там в джоулево тепло, нагревающее проводник. На всё это потребуется промежуток времени, который в ряде случаев может практически выражаться секундами. Однако, если бы скорость движения электромагнитной энергии, в которую преобразуется энергия потока самоиндукции, была в этих условиях равна скорости света, то время протекания описываемого процесса, заканчивающегося прекращением тока в цепи, было бы сравнительно ничтожно мало. При возможных обычных размерах цепи на это потребовалось бы время не более одной стомиллионной доли секунды или, во всяком случае, время подобного порядка. Ясно, следовательно, что скорость движения электромагнитной энергии в рассмотренных условиях должна быть значительно меньше скорости света. К тому же заключению мы приходим и в случае движения электромагнитной энергии в пространстве вокруг некоторого заряженного тела, перемещаемого с какой-либо скоростью, хотя бы с наибольшей практически достижимой.

§ 66. Движение электромагнитной энергии в цепи тока

а. Возникновение энергетических процессов в цепи электрического тока было вкратце рассмотрено нами в § 58, где шла речь о случае перехода от сверхпроводящей цепи к обычной цепи, обладающей некоторым конечным сопротивлением ($r > 0$). При этом мы имели в виду превращение в джоулево тепло запасенной в цепи энергии потока самоиндукции, т. е. электрокинетической энергии тока

$$T_e = \frac{1}{2} Li^2.$$

Вообще же говоря, преобразование электрокинетической энергии, если не полностью, то хотя бы отчасти может пойти и по другим направлениям. При наличии соответствующих условий электрокинетическая энергия тока могла бы превращаться в механическую работу. Это — случай двигательного электромагнитного процесса (см. § 33 Главы IV). Возможно также расходование энергии тока на всякого рода электрохимическую работу. Ради упрощения наших дальнейших рассуждений из всех указанных разновидностей энергетического процесса, могущих протекать в цепи тока, мы в основном будем говорить только о случае образования джоулева тепла.

б. Как было уже отмечено выше (§§ 58 и 65), начальная стадия энергетического процесса в цепи, предварительно обладавшей свойством сверхпроводимости, связана с переходом магнитных линий потока самоиндукции в состояние движения, и это сопровождается возникновением электрического поля в пространстве, где движутся магнитные линии.

Иными словами, энергетический процесс в цепи тока начинается с момента появления электромагнитого поля в рассматриваемой системе.

Откуда черпается в данном случае (переход от сверхпроводящей к обычной цепи) электромагнитная энергия, направляющаяся внутрь проводника из окружающего его пространства? Ответ на поставленный вопрос может быть только один. Конечно, магнитная составляющая электромагнитной энергии представляет собой непосредственно часть энергии потока самоиндукции. Что же касается электрической составляющей электромагнитной энергии, то, за отсутствием иных источников, мы несомненно должны трактовать её как результат преобразования другой части энергии потока самоиндукции в энергию электрического поля.

Есть полное основание утверждать, что во время протекания всех вообще энергетических процессов электромагнитного характера может происходить преобразование энергии магнитного поля (энергии магнитного потока) в энергию электрического поля и, обратно, энергии электрического поля — в энергию магнитного поля.

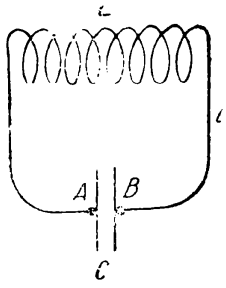


Рис. 175.

В качестве весьма поучительного примера подобных взаимных преобразований магнитного и электрического полей полезно остановиться на рассмотрении колебательного процесса в цепи, содержащей самоиндукцию L и конденсатор с емкостью C (рис. 175). Предположим, что весь контур цепи состоит из сверхпроводящих частей ($r=0$) и что в данных условиях не имеет места электромагнитное излучение. В таком случае запас энергии в цепи ни на что не будет расходоваться. Допустим, что в начале цепь замкнута накоротко при помощи какого-либо сверхпроводящего же мостика, перекинутого между точками A и B (на рис. 175 не показанного), и что сила тока, проходящего по цепи в направлении против часовой стрелки, равна I_m. Весь основной запас энергии в цепи выражается энергией магнитного потока самоиндукции, т. е. электрокинетической энергией

$$T_e = \frac{1}{2} L I_m^2.$$

Прервем теперь короткое замыкание между точками A и B, иными словами, между пластинами конденсатора. Вследствие электромагнитной инерции ток в цепи в течение некоторого времени продолжается, но сила его будет последовательно ослабевать по мере заряжения конденсатора и в связи с возникновением разности потенциалов между его обкладками, противодействующей этому току i. В конце концов ток в цепи совершенно прекратится в момент достижения разностью потенциалов возможного отрицательного максимума $-U_m$, и мы будем тогда иметь

$$i=0,$$
$$U_A - U_B = -U_m.$$

Первоначальный запас электрокинетической энергии тока окажется полностью исчерпанным, но, вместо него, в рассматриваемой системе возникнет энергия электрического поля между пластинами конденсатора. На основании закона сохранения энергии можем написать

$$\frac{1}{2} C U_m^2 = \frac{1}{2} L I_m^2 = T_e.$$

После этого начнется процесс разряжения конденсатора, причем ток i пойдет в обратном направлении, непрерывно усиливаясь от нуля до $-I_m$. В момент достижения этого максимума тока будем иметь

$$i = -I_m,$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = 0.$$

Снова полностью восстановится первоначальный запас электрокинетической энергии T_e, т. е. энергии потока самоиндукции, и затем всё продолжается, как было только что описано, но только при обратном направлении тока i и т. д. В системе возникает колебательный электромагнитный процесс, который, теоретически говоря, может происходить сколь угодно долго. Во всё время протекания этого колебательного процесса будут совершаться периодические преобразования магнитного поля в электрическое и обратно. Вместе с тем связанная с данной системой энергия будет поочередно принимать то форму энергии магнитного потока, то форму энергии электрического поля. В промежутках между максимумами силы тока ($\pm I_m$) и разности потенциалов обкладок конденсатора ($\mp U_m$), когда процесс перехода энергии из одной формы в другую еще не завершен полностью и когда в системе мы встречаемся с подлинной электромагнитной энергией, сумма энергии потока самоиндукции (энергии магнитного поля) и энергии электрического поля должна быть в точности равна максимуму энергии электрического поля или максимуму энергии магнитного поля, т. е. в любой момент времени будет

$$\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} Cu^2 = \frac{1}{2} CU_m^2 = \frac{1}{2} LI_m^2 = T_e.$$

Если рассматриваемая цепь обладает конечным сопротивлением ($r \neq 0$), не превышающим некоторого предела, так что в ней может возникнуть колебательный процесс, и если это сопровождается электромагнитным излучением, то в связи с непрерывным расходованием энергии системы интенсивность описываемого колебательного процесса должна, как известно, ослабевать с течением времени. Последовательно достигаемые максимальные значения тока и разности потенциалов между обкладками конденсатора будут становиться всё меньше и меньше, пока колебательный процесс полностью не затухнет после израсходования всего первоначального запаса энергии на электромагнитное излучение и на образование джоулева тепла. Однако и в этом случае мы будем иметь дело с вышеуказанными взаимными преобразованиями магнитного и электрического полей, лишь осложненными непрерывным рассеянием энергии системы.

Итак, поток самоиндукции Φ_s может преобразовываться в электрическое поле (в данном случае между обкладками конденсатора). И обратно, имеющееся в системе электрическое поле может преобразовываться в поток самоиндукции Φ_s. Надо полагать, что в разобранном примере (рис. 175) мы встречаемся не с каким-либо исключительным случаем, но что взаимные преобразования магнитного и электрического полей могут происходить и в действительности происходят во всякой электрической цепи, в которой имеют место энергетические процессы, связанные с движением электромагнитной энергии. В зависимости от наличных условий полный запас энергии в цепи тока может соответственным образом перераспределяться между двумя формами — энергией магнит-

ного поля и энергией электрического поля. В отдельных частных случаях, как мы только что видели, может явно обнаруживаться только одна из этих предельных форм: либо энергия магнитного поля, либо энергия электрического поля.

Мы пока не знаем сущности указанных взаимных преобразований, но во всяком случае, как мы не раз это отмечали, они свидетельствуют о внутреннем единстве магнитного и электрического полей. Одно несомненно, а именно, что структура обоих названных полей имеет в своей основе нечто общее. В противном случае были бы совершенно немыслимы легкость и обратимость их взаимных преобразований. Непонятно было бы также, как они могут сливаться в форме единого электромагнитного поля. Вскрытие истинного соотношения между магнитным полем и электрическим полем есть задача, стоящая перед будущими исследователями природы электромагнитного поля.

в. Рассмотрим несколько подробнее вопрос о движении электромагнитной энергии в цепи тока. Прежде всего остановимся на основном случае перехода от сверхпроводящей цепи к обычной цепи с конечным сопротивлением ($r \neq 0$).

Допустим, что по некоторой сверхпроводящей цепи (см., например, рис. 171 в § 65) проходит ток i_0. Первоначальный запас энергии в этой цепи существует в форме энергии потока самоиндукции Φ_s и равен

$$T_e = \frac{1}{2} L i_0^2.$$

В момент исчезновения свойства сверхпроводимости начинается движение сокращающихся магнитных линий потока Φ_s (§ 58). Как мы уже говорили, с этим же моментом надо связывать появление электрического поля в пространстве вокруг проводника, причем энергия электрического поля черпается из основного запаса T_e. В системе возникает электромагнитное поле, которое движется по направлению к поверхности проводника и вносит в объем его электромагнитную энергию, слагающуюся из энергии магнитного поля и энергии электрического поля. Произведем подсчет количества энергии, поглощаемой при этом веществом проводника за время убывания тока от начальной величины i_0 до нуля.

Каждая поглощенная проводником магнитная линия потока самоиндукции вносит туда свою магнитную энергию, равную (см. § 21 Главы III)

$$W_1 = \frac{1}{2} i.$$

Количество магнитных линий (магнитных звеньев) dn, входящих в объем проводника за время элементарного изменения потока самоиндукции, будет равно этому изменению $d\Phi_s$ по абсолютной величине и обратно ему по знаку, т. е. будем иметь

$$dn = -d\Phi_s = -L di.$$

Следовательно, магнитная составляющая вносимой в проводник энергии за этот же элементарный промежуток времени может быть выражена так:

$$dW_m = -\frac{1}{2} i \cdot L di.$$

А всё количество энергии магнитного поля, которое поглощается веществом проводника за время, протекшее до полного прекращения тока в цепи, будет

$$W_m = -\frac{1}{2} L \int_{i_0}^{0} i\,di = \frac{1}{4} L i_0^2 = \frac{1}{2} T_e.$$

Иными словами, только половина первоначальной энергии потока самоиндукции Φ_s войдет внутрь проводника в форме энергии магнитного поля. Другая же половина T_e поглощается проводником в форме энергии возникшего электрического поля, в которую преобразуется часть энергии магнитного потока Φ_s. Действительно, предполагая, что энергия электрического поля вносится внутрь проводника направляющимися в него единичными трубками электрического смещения (фарадеевскими трубками), присущую каждой такой трубке энергию можем выразить половиной линейного интеграла электрической силы E, взятым по всей длине трубки. Таким образом, энергия фарадеевской трубки, находящейся у самой поверхности проводника, оказывается равной

$$\frac{1}{2} \oint E dl = -\frac{1}{2} L \frac{di}{dt},$$

так как в данном случае в возникшем электромагнитном поле фарадеевские трубки должны образовывать, вообще говоря, замкнутые контуры, параллельные контуру цепи.

Количество фарадеевских трубок, поглощаемых проводником за некоторый элементарный промежуток времени dt, выразится через dq, т. е. через количество электричества, которое протекает через поперечное сечение цепи в течение времени dt (см. § 62). Поэтому энергию электрического поля, входящую в проводник за то же время dt, необходимо считать равной

$$dW_e = -\frac{1}{2} L \frac{di}{dt} \cdot dq.$$

Полная электрическая составляющая электромагнитной энергии, которая поступает извне в объем проводника за время с момента исчезновения свойства сверхпроводимости цепи до окончательного прекращения тока, выразится следующим образом:

$$W_e = -\frac{1}{2} L \int_{i_0}^{0} \frac{di}{dt} \cdot dq = -\frac{1}{2} L \int_{i_0}^{0} \frac{di}{dt} \cdot i dt = -\frac{1}{2} L \int_{i_0}^{0} i\,di = -\frac{1}{4} L i_0^2 =$$
$$= \frac{1}{2} T_e = W_m.$$

Вся же электромагнитная энергия, превратившаяся в джоулево тепло, в рассматриваемом случае будет

$$W_{em} = W_e + W_m = T_e = \frac{1}{2} L i_0^2,$$

т. е. по своей величине представляет собой именно энергию первоначального потока самоиндукции Φ_s.

Здесь следует особо отметить следующие обстоятельства. Во-первых, движущаяся извне по направлению к проводнику и поглощаемая им

электромагнитная энергия слагается из двух равных по величине частей W_m и W_e. В этом мы должны усмотреть подтверждение высказанного в предыдущем § 65 соображения о том, что, повидимому, и несвободное распространение электромагнитной энергии сопровождается переносом двух равных по величине ее составляющих: энергии магнитного поля и энергии электрического поля. Во-вторых, энергия магнитного потока Φ_s, которая в конце концов полностью поглощается веществом проводника, проявляясь там в форме джоулева тепла, частично претерпевает *промежуточное преобразование* в энергию электрического поля.

г. Рассмотрим теперь случай обычной электрической цепи, обладающей конечным сопротивлением ($r \neq 0$). Выделим в каком-либо месте этой цепи участок проводника AB, длиною в 1 см (рис. 176). При прохождении тока i по данному проводнику, в условиях установившегося режима постоянного тока, между точками A и B возникает разность потенциалов, равная падению напряжения вдоль этого участка

$$U_A - U_B = ri.$$

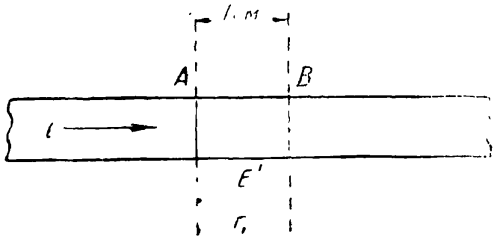


Рис. 176.

Так как длина участка AB по заданию есть 1 см, то эта же разность потенциалов равна той составляющей электрической силы, которая у самой поверхности проводника направлена параллельно его оси. Обозначим указанную составляющую электрической силы через E'.

На основании закона электромагнитной индукции мы можем рассматривать величину E' в качестве меры количества сокращающихся магнитных звеньев потока самоиндукции, которые ежесекундно входят извне в объем проводника на участке AB. Таким образом, для величины магнитной составляющей электромагнитной энергии, поглощаемой участком AB в течение промежутка времени t и вносимой магнитными звеньями, будем иметь

$$W'_m = \frac{1}{2} i \cdot E't = \frac{1}{2} E'it.$$

С другой стороны, электрическую составляющую электромагнитной энергии, входящей в объем участка AB за тот же промежуток времени, мы можем выразить произведением энергии, несомой одним сантиметром единичной трубки электрического смещения (фарадеевской трубки) у самой поверхности проводника, на число поглощенных им фарадеевских трубок, т. е. на q — количество электричества, протекшего через поперечное сечение проводника. Получаем

$$W'_e = \frac{1}{2} (U_A - U_B) \cdot q = \frac{1}{2} E'it.$$

Опять-таки отметим, что и в данном случае сохраняется соотношение

$$W'_m = W'_e.$$

Полное количество электромагнитной энергии, поглощаемой участком AB в течение промежутка времени t в рассматриваемых условиях, выразится так

$$W'_{em} = W'_m + W'_e = E'it = P_1 t,$$

где P_1 есть мощность, расходуемая в цепи тока на участке длиною в 1 см, т. е.

$$P_1 = E'i = (U_A - U_B)\, i.$$

Произведем, наконец, подсчет этой же мощности P_1, пользуясь вектором Пойнтинга S. В каждой точке поверхности проводника мы будем иметь взаимное расположение векторов S, H и E', представленное на рис. 177.

Необходимо при этом сделать следующее разъяснение. Рассматривая вопрос о движении электромагнитной энергии внутрь участка проводника AB (рис. 176), мы должны принимать во внимание только ту составляющую E' полной электрической силы E, которая у самой поверхности проводника параллельна его оси. Тогда соответствующий этой электрической силе E' вектор Пойнтинга S будет направлен внутрь проводника нормально к его оси. Вообще же говоря, в пространстве вокруг проводника, вдоль которого распространяется электромагнитная энергия, вектор полной электрической силы E не будет параллелен оси проводника, в связи с чем и полный вектор Пойнтинга оказывается наклонным относительно оси проводника, имея составляющую вдоль него. Эта продольная составляющая вектора Пойнтинга имеет некоторое конечное значение всегда, когда данный проводник принимает участие в передаче электромагнитной энергии к другим частям цепи (например, к приемникам). Показанное же на рис. 177 расположение векторов S, H и E' относится к случаю, когда мы говорим только о мощности, расходуемой на участке AB (рис. 176).

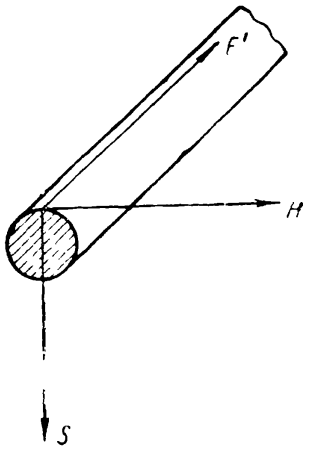


Рис. 177.

На основании закона магнитодвижущей силы можем написать следующее соотношение, определяющее величину магнитной силы H в некоторой точке на поверхности цилиндрического проводника:

$$H = \frac{i}{2\pi a},$$

где a — радиус поперечного сечения проводника.

Соответствующая величина вектора Пойнтинга выразится так:

$$S = E'H = \frac{E'i}{2\pi a}.$$

Это есть мощность, поглощаемая 1 $см^2$ поверхности проводника. Вся же поверхность отрезка AB (рис. 176) равна $2\pi a$ $см^2$. Следовательно,

$$P_1 = S \cdot 2\pi a = E'i = (U_A - U_B)\, i.$$

Таким образом, пользуясь вектором Пойнтинга, мы приходим к тому же выражению для мощности, поглощаемой проводником, которое дают и другие общеизвестные соотношения.

д. В заключение настоящего параграфа рассмотрим в общих чертах случай передачи энергии по проводам от некоторой генераторной станции к приемникам.

Независимо от того, входят ли проводники в состав собственно линии передачи, или они являются частями генераторного устройства или же частями какой-либо приемной системы, преобразующей электромагнитную энергию в джоулево тепло, а также в другие виды энергии (например, в случае электродвигателя), все участки цепи в известной мере потребляют энергию тока. Эта энергия распространяется от генератора через диэлектрик, окружающий проводники, но не сквозь вещество проводников, т. е. не протекает через их поперечное сечение. Провода линии передачи играют роль направляющих потока электромагнитной энергии, которая, двигаясь вдоль них, отчасти проникает извне в вещество проводов и преобразуется там в джоулево тепло. Это составляет так называемые потери в линии. В пространстве, окружающем провода линии передачи, вектор Пойнтинга имеет главную составляющую, параллельную проводам и характеризующую ту часть потока электромагнитной энергии, значительная часть которой доходит до приемников. Вторая же, меньшая, составляющая вектора Пойнтинга, перпендикулярная оси провода и рассмотренная выше (рис. 177), определяет собой практически неизбежные потери электромагнитной энергии в линии передачи. Если бы данная линия состояла из сверхпроводников, то указанная вторая составляющая вектора Пойнтинга полностью отсутствовала бы, и мы имели бы идеальный случай передачи энергии с коэффициентом полезного действия в 100%.

В случае питания линии передачи от генераторной станции переменного тока описанная схема движения энергии в цепи осложняется процессом периодического возникновения и исчезновения потока самоиндукции. Магнитные звенья, нанизываемые на контур цепи и входящие в состав потока самоиндукции, мы рассматриваем как результат соответствующего отпочковывания этих звеньев от главного магнитного потока в электромагнитном генераторе станции. Они распространяются при посредстве проводов линии по всей замкнутой цепи тока. В условиях работы станции при $\cos\varphi = 1$ в альтернаторе, установленном на ней, происходит только этот генераторный электромагнитный процесс (см. § 32 Главы IV), периодически усиливающийся и ослабляющийся. Вектор Пойнтинга в этом случае, претерпевая периодические изменения по абсолютной величине, неизменно сохраняет основное направление вдоль линии передачи. Если же $\cos\varphi < 1$, то в течение некоторой сравнительно небольшой доли каждого полупериода в альтернаторе имеет место двигательный электромагнитный процесс (см. § 33), во время которого хотя бы часть магнитных звеньев потока самоиндукции, связанного со всей цепью линии передачи, обратно воссоединяется с главным магнитным потоком машины. Основное направление вектора Пойнтинга, параллельное линии передачи, будет при этом периодически менять свой знак. В случае трехфазного тока при $\cos\varphi < 1$ подобное чередование генераторного и двигательного процессов в надлежащей последовательности происходит в каждой из трех частей арматуры трехфазной машины. В связи с этим движение электромагнитной энергии вдоль каждого из проводов трехфазной линии передачи будет претерпевать периодическое изменение направления, причем соответственно будет изменять свое направление и вектор Пойнтинга в пространстве вокруг данного провода.

Отвлекаясь от указанных осложняющих обстоятельств, сосредоточим

внимание на случае передачи энергии постоянным током от какой-либо динамомашины G (рис. 178) по проводам AB и CD к приемнику BD, который ради упрощения всех рассуждений будем в основном представлять себе в виде некоторого полезного сопротивления r, превращающего электромагнитную энергию в джоулево тепло. Допустим сначала, что сила тока i достаточно велика для того, чтобы мог полностью развиться процесс отпочковывания магнитных звеньев в динамомашине G по схеме, рассмотренной в § 32 Главы IV и иллюстрированной рис. 88—90. Генерированные магнитные звенья, нанизываясь на контур цепи, распространяются вдоль проводов AB и CD по направлению к полезному сопротивлению r вместе с возникающим в данной системе электрическим полем.

Здесь целесообразно отметить следующее обстоятельство. Нет никаких оснований предполагать, будто бы магнитные звенья неодинаково распространяются вдоль каждого из проводов AB и CD. Если элементарные магнитные линии имеют вихревую природу и действительно представляют собой вихревые нити, то всё же магнитное звено потока самоиндукции может обладать способностью перемещаться в любом направлении, нормальном к охватываемой им поверхности. Стремление какого-либо вихревого кольца самостоятельно двигаться в некотором определенном направлении (см. рис. 67, § 29 Главы IV) должно проявляться тем интенсивнее, чем меньше отношение диаметра кольца к диаметру вихревой нити, из которой оно образовалось. В случае микрофизических размеров магнитного вихревого кольца это отношение диаметров, надо полагать, сравнительно очень невелико, и самостоятельное движение вихря может отчетливо обнаружиться (см. §§ 59 и 60). Когда же указанное отношение диаметров чрезвычайно велико, как это должно иметь место в отношении макрофизических магнитных звеньев, нанизанных на проводник, то стремление их к самостоятельному перемещению может быть пренебрежимо ничтожно и основной причиной их распространения вдоль проводов линии AB и CD необходимо считать боковой распор, который всегда проявляется в каждой системе одинаково направленных магнитных линий.

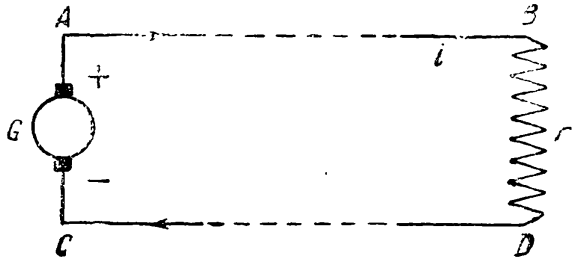


Рис. 178.

В генераторе G магнитные звенья отпочковываются со скоростью, определяемой величиною индуктируемой в нем электродвижущей силы e. Будем выражать все величины в единицах абсолютной электромагнитной системы. Если иметь в виду единичные трубки магнитной индукции, то можно сказать, что ежесекундно отпочковывается e магнитных звеньев, которые оказываются нанизанными на контур цепи и входят в состав потока самоиндукции, а затем движутся вдоль обоих проводов AB и CD по направлению к приемнику BD, где происходит основной процесс выбывания их из состава указанного магнитного потока.

Обратимся теперь к соотношениям, характеризующим рассматриваемый случай с энергетической точки зрения. Полная мощность P_0, развиваемая генератором, будет

$$P_0 = ei.$$

Так как энергия каждой единичной трубки магнитной индукции, охватывающей ток i, по своей величине равна $\frac{1}{2}i$, то мощность генератора G, идущая на образование отпочковывающихся магнитных звеньев, выразится следующим образом:

$$P_m = \frac{1}{2}ei,$$

где через P_m обозначена часть полной мощности P_0, расходуемая на восполнение убыли энергии магнитного поля (потока самоиндукции). Как уже неоднократно указывалось, эта убыль находится в связи с непрерывным поглощением электромагнитной энергии всеми сопротивлениями цепи. Другая половина полной мощности P_0 (обозначим ее через P_e) расходуется на восполнение энергии электрического поля, так что

$$P_0 = P_m + P_e.$$

Полученное соотношение должно быть сопоставлено со сказанным выше о двух равных по величине составляющих (магнитной и электрической) той электромагнитной энергии, которая входит извне в объем какого-либо проводника, потребляющего энергию тока.

Как уже не раз указывалось, электрическое поле вокруг проводов линии передачи, вообще говоря, можно считать результатом движения магнитных звеньев вдоль этих проводов. Кроме того, электрическое поле должно возникать и в ходе электромагнитных процессов, совершающихся в самом генераторе G. Повидимому, мы встречаемся и здесь в основном с преобразованиями магнитного поля в электрическое. Дело в том, что первичной физической реальностью в данном случае является главный магнитный поток динамомашины. Так как электрическое поле, обнаруживаемое в цепи тока, не может возникать из ничего, то и приходится во всех случаях рассматривать его как результат какого-то преобразования указанного исходного магнитного потока. Детали процесса взаимных преобразований магнитного и электрического полей еще совершенно не вскрыты. Однако возможность и даже необходимость существования таких преобразований в цепи электрического тока в высокой степени вероятны. Об этом уже была речь выше.

В процессе электромагнитной индукции, который происходит в генераторе G, где всё время деформируется главный магнитный поток и непрерывно перемещаются проводники арматуры относительно этого потока, мы безусловно встречаемся со всякого рода движениями магнитных линий в пространстве вокруг проводников. Помимо разбегания образовавшихся магнитных звеньев в обе стороны по направлению к проводам линии передачи AB и CD, несомненно должно иметь место также увеличение диаметра каждого возникшего магнитного звена, что представляет собой движение магнитных линий в радиальном направлении от оси проводника в процессе восполнения потока самоиндукции. Всё это, вместе взятое, само по себе создает условия для появления соответствующего электрического поля. Энергию же его в данном случае можно рассматривать как эквивалент соответствующей части механической работы первичного двигателя, расходуемой на преодоление сил бокового распора во всей системе деформируемых и движущихся магнитных линий. Заметим, кстати, что в случае, если вместо простого полезного сопротивления r, включенного между точками B и D (рис. 178), приемником энергии тока служит какой-либо электродвигатель, электрическое поле должно претерпевать в нем процесс преобразования, обратный происхо-

дящему в генераторе G. При этом возможно предполагать, что энергия электрического поля расходуется при совершении механической работы через посредство сил бокового распора в системе магнитных линий, непрерывно воссоединяющихся с главным потоком электродвигателя. Работа же сил тяжения этих магнитных линий может быть отнесена за счет поглощаемой электродвигателем магнитной составляющей электромагнитной энергии.

В случае, когда сила тока в цепи настолько мала, что процесс отпочкования магнитных звеньев в генераторе G недоразвивается до конца, всё же остается непрерывное деформирование главного магнитного потока, сопровождаемое пространственным перемещением деформированных участков магнитных линий. Это и должно обусловливать появление электрического поля, распространяющегося от генератора вдоль проводов линии передачи по направлению к приемнику. В то же время движущееся электрическое поле, повидимому, частично претерпевает обратное преобразование в магнитное поле, восполняя до известной степени процесс возникновения законченных магнитных звеньев, которые входят в состав потока самоиндукции сравнительно слабого в данном случае тока. (При этом необходимо, конечно, учесть и всё то, что было сказано в § 64.)

Наконец, в случае отключения приемника BD от линии передачи, т. е. в случае разомкнутой цепи, сохраняется лишь непрерывное перемещение проводников арматуры динамомашины относительно ее главного магнитного потока и остается, так сказать, тенденция к деформированию магнитных линий этого потока, в результате чего в системе поддерживается раз возникшее электрическое поле (см. § 32 Главы IV). При этом в генераторе G прекращаются энергетические преобразования и будем иметь

$$P_0 = 0.$$

Если снова приключить приемник BD к линии передачи, то в начальной стадии возникновения тока в цепи, по всей вероятности, происходит частичное преобразование имеющегося в системе электрического поля в магнитное, и, далее, начавшееся деформирование магнитных линий главного потока в генераторе G будет поддерживать в цепи тот или иной установившийся режим.

Во всяком случае не может подлежать сомнению, что во всякой цепи тока взаимные преобразования магнитного и электрического полей вообще играют весьма существенную роль.

В связи со всем, что было изложено в последних параграфах настоящей Главы VI, становится совершенно очевидным следующее. Когда речь идет о питании энергией тока приемников, находящихся на большом расстоянии от генераторной станции, *по существу надо говорить о передаче электромагнитной энергии по проводам.* Однако исторически так сложилось, что недостаточный учет всех обстоятельств, сопровождающих энергетические процессы в цепи тока, привел к широкому распространению обычных, не совсем правильных терминов „передача электрической энергии“ или „электрическая передача энергии“.

§ 67. Общие выводы по вопросу о природе электрического тока

а. Подведем теперь некоторые итоги всему, сказанному в настоящей Главе VI и имеющему непосредственное отношение к вопросу о том, что́ же представляет собой физическое явление, которое мы обычно называем „электрическим током“.

Как было уже отмечено, до настоящего времени науке еще не удалось разработать законченную картину электромагнитного процесса, происходящего в цепи электрического тока. Мы пока не умеем в достаточной степени полно охватить все стороны данного, вообще говоря, сложного электромагнитного явления и ясно представить себе его как единое целое. Вместо этого, мы обычно сосредоточиваем внимание то на одном, то на другом свойстве электрического тока, в связи с чем и возникло несколько точек зрения по вопросу о его природе. Однако есть известное основание полагать, что эти различные воззрения, казалось бы, не имеющие почти ничего общего между собой, в действительности не противоречат и не исключают друг друга совершенно, но по существу взаимно дополняют друг друга, освещая лишь отдельные стороны одного и того же физического явления.

Целый ряд соображений, развитых в главе VI, позволяет утверждать следующее: *во всех случаях электрического тока главнейшую роль играет магнитный поток самоиндукции.* Поэтому необходимо признать справедливым указание Фарадея на то, что наши обычные представления об электрическом токе, быть может, *ошибочны* (§ 46). Таким образом, в настоящее время уже невозможно назвать безупречным общепринятое определение тока в качестве физического явления, в основе которого лежит только движение электричества. Это не соответствует тому, что происходит в действительности. Никак нельзя считать допустимым игнорирование принципиального значения потока самоиндукции.

Конечно, нам еще не известны многие подробности процесса, совершающегося в цепи тока, а то, что известно, лишь чуть-чуть приоткрывает край завесы, скрывающей от исследователя сущность электрического тока. Однако, и это в сумме можно рассматривать как некоторое заметное приближение к правильному пониманию данного физического явления. Всё это должно быть использовано при дальнейшем углублении в проблему природы электрического тока и при образовании представлений о нем, в возможно большей степени соответствующих действительности.

Ниже мы в известной последовательности даем сводку того, что́ уже теперь можно считать достоверным и бесспорно установленным в отношении природы электрического тока и что́, по нашему мнению, всегда необходимо принимать во внимание.

6. Вообще, при рассмотрении всякого физического явления мы склонны искать его сущность в тех процессах, которые непосредственно связаны с энергетической стороной этого явления. Подобное направление мыслей изучающего то или иное явление диктуется всей совокупностью данных естествознания.

В случае электрического тока, который протекает по некоторой цепи, главный запас энергии распределен в пространстве, окружающем проводник. Именно здесь имеет место органически связанный с током магнитный процесс, воспринимаемый нами в форме потока самоиндукции. И именно этот поток самоиндукции следует рассматривать в качестве носителя электрокинетической энергии тока (T_e), в точности равной энергии магнитного поля тока. Основная роль указанного запаса энергии тока особенно отчетливо обнаруживается, когда цепь полностью состоит из сверхпроводников и когда в ней совершенно отсутствует энергия какого-либо иного вида (см. §§ 50—53 и 56—57). Итак, *сущность явления электрического тока необходимо усматривать в потоке самоиндукции, принципиально связанном со всякой цепью тока.*

То особенное движение, которое принято понимать как движение электричества в проводнике, находится в самой тесной связи с окру-

жающим его потоком самоиндукции и представляет собой нечто, необходимо сопутствующее тому, что совершается в магнитном поле тока. *Движение электричества само по себе ничего не привносит в электрокинетическую энергию тока.* В этом отношении весьма характерно следующее обстоятельство. Мы никак не можем вычислить электрокинетическую энергию тока, оперируя только с тем, что происходит в самом проводнике, имея дело лишь с движущимся электричеством, как таковым, и полностью игнорируя пространство вне объема проводника.

Единственным неизменным и безусловно всегда наблюдаемым признаком тока является его поток самоиндукции. В пространстве, окружающем проводник, по которому проходит „электрический" ток, может совершенно отсутствовать электрическое поле, все точки этого проводника могут иметь один и тот же электрический потенциал, и ток может не сопровождаться образованием джоулева тепла в проводнике (сверхпроводящие цепи). Можно говорить об электрическом токе в условиях, когда не происходит никаких движений электронов, ионов или каких-либо иных носителей электрического заряда (изменяющееся электрическое смещение в „пустоте"). Представить же себе ток без соответствующего магнитного потока самоиндукции мы абсолютно не в состоянии. Подобного тока в природе не существует. Так называемый закон магнитодвижущей силы отражает в себе специфическую роль потока самоиндукции, охватывающего проводник, и свидетельствует о внутреннем единстве этого магнитного потока и того движения „электричества", которое обычно принято отождествлять с перемещением элементарных электрических зарядов. В то же время недостаточно учитывается введенное Максвеллом в науку представление об электрическом смещении, между тем как синтез этого плодотворного представления с идеей Фарадея об электротоническом состоянии мог бы, надо полагать, весьма содействовать установлению более углубленного понимания того, как именно следует трактовать движение „электричества" в цепи тока.

При протекании энергетических процессов в цепи тока электромагнитная энергия распространяется не сквозь поперечные сечения проводника, но через диэлектрик, окружающий проводник. Вектор Пойнтинга определяет удельную мощность потока электромагнитной энергии во всех точках пространства вокруг проводника с током. Движущееся же в проводнике электричество само по себе не является передатчиком электромагнитной энергии в цепи тока. Однако движение электричества сообщает проводнику способность служить осью энергетического процесса, совершающегося вокруг него (axis of power, по Фарадею). Благодаря этому провода линии передачи могут играть роль направляющих потока электромагнитной энергии, распространяющейся от генераторного центра к приемникам.

В связи со сказанным нельзя не признать, что термин „электронный транспорт", который некоторое время тому назад применялся иногда для обозначения передачи электромагнитной энергии по проводам, является плодом глубокого недоразумения, основанного на полном игнорировании законов движения этой энергии. Неприемлемость и порочность данного термина весьма наглядно иллюстрируется тем фактом, что объем проводника линии передачи с движущимися в нем электронами представляет собой, так сказать, кладбище электромагнитной энергии, которая там превращается в энергию беспорядочного движения частиц вещества. Если „электронный транспорт" и принимает некоторое участие при передаче энергии, так только в качестве пара-

зитного процесса, который обусловливает тепловые потери в линии передачи и понижает коэффициент полезного действия всей установки.

Как бы мы ни понимали движение электричества в цепи тока, во всяком случае именно оно сообщает проводнику, кроме способности служить направляющей при распространении электромагнитной энергии, еще особенное свойство, благодаря которому контур тока, со всех сторон охватывающий поток самоиндукции, всегда замыкает и стягивает пучок магнитных линий этого потока. Мы можем говорить о „стягивании" в полном смысле этого слова, так как вследствие бокового распора в системе одинаково направленных магнитных линий обычно обнаруживается стремление потока самоиндукции раздвинуться и занять возможно больший объем. В результате этого со стороны потока самоиндукции возникают давления на охватывающий его проводник, и если контур проводящей цепи может как-либо деформироваться, то в действительности и происходит его деформирование в соответствии с распределением сил давления.

в. После всего вышеизложенного становится вполне очевидной неудовлетворительность общепринятого определения тока, когда ограничиваются указанием лишь на движение электричества и совершенно умалчивают о наиболее существенном признаке электрического тока — его потоке самоиндукции.

Представляется более целесообразным дать следующее определение тока:

Электрическим током называется электромагнитное явление, связанное с замкнутым контуром, который охватывает и стягивает магнитный поток самоиндукции, причем это свойство контура обусловливается движением электричества вдоль него.

г. Сформулированное нами определение физического явления, называемого электрическим током, отражает в себе сущность основных установок Фарадея и Максвелла. Многие соображения, которые были высказаны ими по вопросу о природе тока и которые несомненно могут направить по верному пути наши усилия разрешить эту проблему, до настоящего времени остаются без должного внимания. Конечно, наука сильно двинулась вперед со времен Фарадея и Максвелла. Открыт целый ряд новых фактов, значительно расширивших область наших знаний об электрических, магнитных и электромагнитных явлениях. Однако до сих пор не устранена та ошибочность привычных представлений об электрическом токе, о которой говорил еще Фарадей. Есть полное основание в меру наших возможностей изжить, наконец, эту ошибку.

Когда мы идем в направлении некоторой определенной цели и при этом вместо того, чтобы продвигаться по открывающемуся перед нами кратчайшему верному пути, как-либо уклоняемся в сторону и начинаем блуждать по окольным дорогам, весьма важно как можно скорее обратить на это внимание. Хотя бы даже окольные дороги и позволяли нам несмотря на ряд встречающихся тупиков, в общем приближаться к цели, рациональнее всё же стремиться выйти на верный прямой путь, не теряя времени. Для этого, вообще говоря, нет никакой надобности обязательно возвращаться вспять к исходной точке. Необходимо только перейти на верный путь. В таком случае мы сохраним полностью все преимущества достигнутого уже приближения к цели и более уверенно пойдем дальше вперед.

Точно так же обстоит дело и в отношении перехода к рассмотрению проблемы электрического тока с точки зрения Фарадея и Максвелла.

Для этого вовсе не требуется отказаться от всего, что дала физическая наука за последние десятилетия, и вернуться на 100 лет назад к какой-либо стадии наших знаний, соответствующей пережитым уже эпохам, как можно было бы думать только при несколько поверхностном понимании путей развития науки. Мы несомненно должны, сохраняя все преимущества современного приближения к пониманию электромагнитных явлений, постараться пересмотреть вопрос о природе электрического тока с полным учетом того, что было сказано по данному поводу Фарадеем и Максвеллом. Это даст только новый толчок физической мысли, откроет новые горизонты и позволит еще быстрее и увереннее двигаться дальше в направлении стоящей перед нами цели — возможно более совершенного познания природы электрического тока.

Мыслимы, однако, возражения, что в настоящее время едва ли ощущается настоятельная потребность в подобного рода пересмотре привычных представлений об электрическом токе. Ведь главнейшие закономерности и основные соотношения, уже известные в этой области, позволили до такой степени овладеть данным физическим явлением, что мы можем констатировать широчайшее развитие практических приложений энергии электрического тока. Казалось бы, не следует пока отказываться от обычных представлений об электрическом токе.

На первый взгляд всё это совершенно верно. Привычные представления, хотя бы и не вполне безупречные, в ряде случаев действительно весьма удобны и могут быть до известной степени полезными. Однако эти привычные представления, если они ошибочны, всё же являются тормозом для дальнейшего прогресса знаний и для установления существенно новых фактов и закономерностей, теоретическое значение которых нельзя даже предвидеть. Вместе с тем интересно отметить следующее обстоятельство. Не чем-либо иным, а именно слепым подчинением привычному методу мышления в значительной степени объясняется и необычайная в свое время стойкость ряда уже отживших научных теорий и воззрений. Напомним, например, о птоломеевой системе мира, о невесомых жидкостях, о теории флогистона. Замечательно при этом, что, несмотря на несомненную ошибочность некоторых научных воззрений старого времени, они иногда позволяли, однако, неуклонно итти вперед по пути прогресса. Так, Сади Карно, считая теплоту за неразрушимый агент, что, как мы знаем теперь, не соответствует действительности, пришел к правильному результату при рассмотрении вопроса о совершении работы паровой машиной. И в наше время, конечно, вполне возможны аналогичные случаи. Но это не мотив для защиты разного рода привычных научных представлений и, в частности, ошибочных представлений об электрическом токе.

Вообще нельзя не признавать очень важного значения привычек и навыков в нашем научном мышлении, но также нельзя не признать и того, что весьма полезно время от времени подвергать их анализу и критическому пересмотру.

Многое из того, что было изложено в настоящей Главе VI, имело непосредственной целью возможно более обнажить ряд недоразумений, вытекающих из наших традиционных представлений об электрическом токе, и доказать, что мысль о вероятной ошибочности этих представлений имеет достаточные основания. Будущим исследователям в области электромагнитных явлений предстоит сделать еще немало в направлении дальнейшего физического анализа этих явлений и вскрытия природы электрического тока во всех деталях. В этом отношении особенно важно надлежащим образом согласовать фарадеевскую идею о реально суще-

ствующих магнитных линиях с представлением Максвелла об электрическом смещении, стационарном и изменяющемся, а также установить истинное соотношение между структурой магнитного поля и структурой электрического поля. Во всяком случае весьма трудно отказаться от убеждения в том, что основные физические воззрения Фарадея и Максвелла представляют собой верную путеводную нить, следование которой должно будет в конце концов дать нам ключ к более совершенному пониманию электромагнитного явления, называемого „электрическим током“, чем это имеет место в настоящее время.

ПЕЧАТНЫЕ ТРУДЫ В. Ф. МИТКЕВИЧА, ИМЕЮЩИЕ ОТНОШЕНИЕ К ТЕМЕ НАСТОЯЩЕЙ КНИГИ

1. К вопросу о зубчатых арматурах. Электричество, 1898, № 6.
2. К теории флюксметра Грассо. ЖФХО, 1906, вып. 2.
3. О природе электрического тока. Телеграфия и телефония без проводов, 1922, № 15.
4. On the Nature of the Electric Current. The Sibley Journal of Engineering (Cornell University), 1923, № 2.
5. О механизме электромагнитной индукции тока. Электричество, 1927, № 2.
6. On the transformations of magnetic flux. ДАН, А, 1929, стр. 131.
7. On the anomalous magnetic flux. ДАН, А, 1929, стр. 136.
8. Anomalous magnetic flux of a toroidal coil. I. The case of a closed iron screen. ДАН, А, 1929, стр. 171.
9. Anomalous magnetic flux of a toroidal coil. II. The case of an unclosed screen. ДАН, А. 1929, стр 257.
10. Total electromotive force of mutual induction. ДАН, А, 1929, стр. 289.
11. Беседы о природе электрического тока. Электричество, 1930, №№ 3, 8 и 10.
12. Магнитизм. Электричество, 1930, юбилейный номер.
13. The work of Faraday and modern developments in the application of Electrical Energy. Труды 2-го Международного конгресса по истории науки и техники, London, 1931.
14. Faraday and Electrical Science in Russia and U. S. S. R. Nature, 1931, № 3226 (29 August).
15 Работы Фарадея в области электромагнитной индукции в связи с его общими физическими воззрениями. Природа, 1931, № 12.
16. К вопросу о природе электрического тока. Социалистическая реконструкция и наука, 1932, № 3.
17. Основные воззрения современной физики. (Речь, читанная в годовом собрании АН СССР 2 февр. 1933 г.). Отчет АН СССР за 1932 г.
18. Фарадей „против" фарадеевской точки зрения. Социалистическая реконструкция и наука, 1933, № 4.
19. К вопросу об условности математической трактовки физических явлений. Электричество, № 12.
20. Физические основы электротехники. Изд. 3-е, 1933. Изд-во „Кубуч".
21. О „физическом" действии на расстоянии. Известия АН СССР, 1933, № 10.
22. О некоторых основных положениях, относящихся к области физики. ДАН, 1934, т. II, № 6.
23. К вопросу о природе электрического тока. Электричество, 1936, № 6.
24. По поводу статьи акад. А. Ф Иоффе „О положении на философском фронте советской физики". Под знаменем марксизма, 1937, № 11—12.
25. Основные физические воззрения. Изд. 3-е. Изд-во АН СССР, 1939.
26. Основные условия возникновения индуктированной электродвижущей силы. Статья в сборнике „Униполярные машины". 1940. Изд-во АН СССР.
27. Объективная реальность магнитного потока. Электричество, 1940, № 10.
28. К вопросу о природе элементарных электрических зарядов. ДАН, 1942, XXXVII, № 3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Введение 5

Глава первая. Магнитный поток как физическая реальность

§ 1. Общая характеристика магнитного поля 9
§ 2. О „физическом" действии на расстоянии 12
§ 3. Магнитный поток как форма движущейся материи 21
§ 4. Эфир 26
§ 5. Магнитный поток как процесс, происходящий в эфире 31

Глава вторая. Основные определения и соотношения

§ 6. Общие соображения 38
§ 7. Магнитный поток 40
§ 8. Плотность магнитного потока. Магнитная индукция 44
§ 9. Единичные трубки магнитной индукции. Магнитные линии 46
§ 10. Магнитная масса. Закон Кулона 48
§ 11. Магнитная сила. Кулоновское определение 50
§ 12. Интенсивность намагничения 54
§ 13. Теорема Гаусса 57
§ 14. Магнитодвижущая сила. Электромагнитное определение магнитной силы и силы тока 59
§ 15. Закон магнитной цепи 64

Глава третья. Основные проявления и свойства магнитного потока

§ 16. Электромагнитная индукция тока 67
§ 17. Принцип непрерывности магнитного потока 70
§ 18. Первая и вторая формулировки закона электромагнитной индукции . . . 77
§ 19. Некоторые частные случаи электромагнитной индукции 81
§ 20. Общее заключение по поводу закона электромагнитной индукции 88
§ 21. Энергия магнитного потока 90
§ 22. Проявления инерции магнитного потока. Принцип сохранения магнитного потока 94
§ 23. Механические проявления магнитного потока 103
§ 24. Переход магнитного потока из одной среды в другую 107

Глава четвертая. Преобразования магнитного потока

§ 25 Основные установки Фарадея 113
§ 26. Примеры сращивания, разделения и деформирования магнитных линий . 117
§ 27. О непрерывных преобразованиях замкнутых пространств 129
§ 28. Аналогии непрерывных преобразований магнитного потока. Струи жидкости. Цепи электрического тока 135
§ 29. Аналогии непрерывных преобразований магнитного потока. Вихревые кольца 140
§ 30. Выводы по вопросу о природе магнитного потока, вытекающие из опытов с дымовыми кольцами 152
§ 31. Основная стадия в процессах сращивания и разделения магнитных линий . 154
§ 32. Преобразования магнитного потока в процессе электромагнитной индукции тока 161
§ 33. Преобразования магнитного потока в двигательном электромагнитном процессе 164
§ 34. Обратимость динамомашины 166

§ 35. Процесс электромагнитной индукции при симметричных преобразованиях магнитного потока 168
§ 36. Третья формулировка закона электромагнитной индукции 172
§ 37. Преобразования магнитного потока тороидальной обмотки, окруженной замкнутым железным экраном 177
§ 38. Преобразования магнитного потока в трансформаторах переменного тока 185
§ 39. Нормальная и аномальная составляющие потока и электродвижущей силы взаимной индукции 188
§ 40. Преобразования магнитного потока тороидальной обмотки, окруженной разомкнутым железным экраном 191

Глава пятая. Проблема магнитного экранирования проводников. Униполярные машины

§ 41. Магнитное экранирование и зубчатые арматуры 202
§ 42. Магнитное экранирование проводников 205
§ 43. Бесколлекторная или униполярная машина постоянного тока 213
§ 44. Примеры ошибочной конструкции униполярных машин 220
§ 45. К вопросу о генерировании постоянного тока в процессе электромагнитной индукции 224

Глава шестая. Природа электрического тока

§ 46. К постановке вопроса о природе электрического тока 227
§ 47. Обоснования электродинамики Максвелла 231
§ 48. Главные составляющие кинетической энергии системы токов 237
§ 49. Электрокинетическая энергия 243
§ 50. Сверхпроводники. Общие соображения 252
§ 51. Возникновение индуктированного тока в сверхпроводящей цепи 255
§ 52. Основная роль потока самоиндукции в сверхпроводящих цепях 259
§ 53. Особенные случаи индуктирования тока на поверхности сверхпроводника . 266
§ 54. Электротоническое состояние 275
§ 55. Электротоническое состояние как основное свойство магнитного потока . . 283
§ 56. Параллельное соединение сверхпроводящих цепей 288
§ 57. Энергетические процессы в сверхпроводящих цепях 292
§ 58. Переход от сверхпроводящей цепи к обычной цепи 300
§ 59. Пределы преобразований магнитного потока в проводнике. Гипотеза вихревого электрона 304
§ 60. Общие соображения по вопросу о вихревой природе элементарных электрических зарядов обоих знаков 306
§ 61. Экспериментальное обследование вопроса о „магнитном эквиваленте статического электричества“ 315
§ 62. Движение электричества в цепи тока 319
§ 63. Принцип непрерывности электрического тока 325
§ 64. Возникновение потока самоиндукции 328
§ 65. Электромагнитное поле. Электромагнитная энергия 332
§ 66. Движение электромагнитной энергии в цепи тока 339
§ 67. Общие выводы по вопросу о природе электрического тока 349

Печатные труды В. Ф. Миткевича, имеющие отношение к теме настоящей книги 355

В. Ф. МИТКЕВИЧ — МАГНИТНЫЙ ПОТОК И ЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

*

Технический редактор *Н. П. Аузин*
Корректор *Н. Н. Пезцова*
Переплет художника
А. С. Эрмана

*

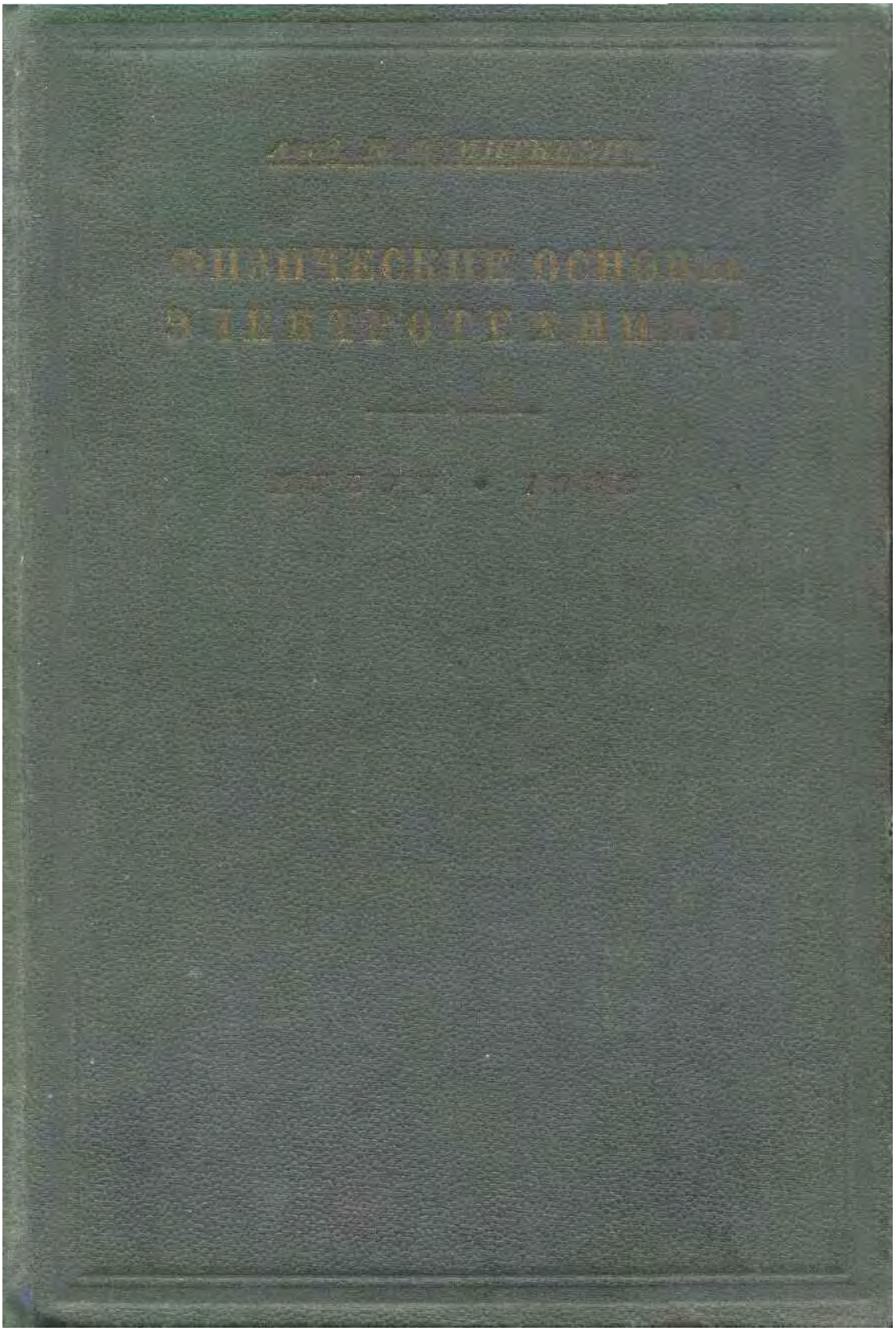
А — 05793. Издат. № 385. Тип. заказ № 184.
Сдано в набор 22/II 1946 г. Подп. к печ. 29/VI 46 г.
Формат бум. 70 × 108 1/16. Печ. л. 22 1/2. Уч.-изд. 32.
Тираж 3000

1-я Типография Издательства Академии Наук СССР
Ленинград, В. О., 9 лин. 12

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
20	11 св.	промежуточная	промежуточная	корр.
32	13 сн.	и высокой	в высокой	„
137	рис. 58		Пропущена буква C на проводе между R_1 и A_2	(авт.)
271	3 св.	поверхности	на поверхности	тип.

В. Ф. Миткевич. Магнитный поток.



В. Ф. МИТКЕВИЧ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ ПЕРЕСМОТРЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ЛЕНИНГРАД 1933

Подготовлено к печати А. В. Миткевич. Техн. редактор М. Ф. Клименко. Сдано в производство 2/IX-33 г. Подписано к печати 18/X-33 г. $28^{3}/_{4}$ п. л. В листе 46550 тип. зн. Ленгорлит № 17994. Форм. бум. 62X88 см. Тираж 7200. Зак. 7011 Корректор К, И. Иосифов.
Гос. тип. «Лен. Правда». Ленинград, Социалист., 14.

МИТКЕВИЧ Владимир Федорович (1872-1951), российский электротехник, академик АН СССР (1929). Участник составления плана Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО). Основные труды по теории и физическим основам электротехники, передаче электрической энергии. Премия им. В. И. Ленина (1928), Государственная премия СССР (1943).
(Большая энкиклопедия Кирилла и Мефодия 97)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Издательство
Предисловие
Предисловие к третьему изданию
6
Предисловие ко второму изданию 6
Из предисловия к первому изданию 10
Введение. 11
Золотые слова! *(прим. копировщика)* 26

Глава I. Магнитный поток

§ 1. Общая характеристика магнитного поля 32
§ 2. Основные определения и соотношения 36
§ 3. Магнитный поток 46
§ 4. Принцип непрерывности магнитного потока. Опыты Фарадея 47
§ 5. Анализ опытов Фарадея 51
§ 6. Математическая формулировка принципа непрерывности потока 52
§ 7 Формулировка закона электромагнитной индукции 55
§ 8. Вопрос об условиях тождественности фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции 58
§ 9. Случай изменяемого контура 61
§ 10. Общий вывод по вопросу о законе электромагнитной индукции 62
§ 11. О преобразованиях магнитного потока 63
§ 12. Механизм перерезывания магнитных линий проводником 70
§ 13. Преобразования магнитного потока в трансформаторе 75
§ 14. Роль магнитных экранов 75
§ 15. Проблема бесколлекторной машины постоянного тока 81
§ 16. Закон магнитной цепи 88
§ 17. Линейный интеграл магнитной силы. Закон магнитодвижущей силы 89
§ 18. Вывод точной формулировки закона магнитной цепи 94
§ 19. Приближенное выражение закона магнитной цепи 95
§ 20. Энергия магнитного потока 97
§ 21. Энергия магнитной линии (единичной трубки магнитной индукции) 100
§ 22. Тяжение магнитных линий 105
§ 23. Подъемная сила магнита 106
§ 24. Отрывной пермеаметр 107
§ 25. Природа электромагнитной силы 107
§ 26. Боковой распор магнитных линий 109
§ 27. Преломление магнитных линий 111
§ 28. Принцип инерции магнитного потока 115
§ 29. Формулировка принципа инерции магнитного потока. Флюксметр 121

Глава II. Магнитные свойства вещества

§ 30. Роль вещества в магнитном процессе 125
§ 31. Фиктивность "магнитных масс" 126
§ 32. Общая характеристика магнитных материалов 130
§ 33. Магнитный цикл 131
§ 34. Гистерезисная петля как характеристика магнитного материала 134
§ 35. Потери на гистерезис 135
§ 36. Расчет потерь на гистерезис и формула Штейнметца 139
§ 37. Гипотеза вращающихся элементарных магнитов 140
§ 38. Магнитное насыщение 147
§ 39. Влияние сотрясений на магнитные свойства 149
§ 40. Влияние температурных условий на магнитные свойства вещества 152
§ 41. Магнитная вязкость 157
§ 42. Изменение размеров тел при намагничении 159
§ 43. Гистерезис вращения 160
§ 44. Некоторые магнитные свойства железа и его сплавов 161

Глава III. Электрическое смещение

§ 45. Общая характеристика электромагнитных процессов 165
§ 46. Непрерывность электрического тока 168
§ 47. Электрическое смещение. Основные положения Максвелла 169
§ 48. Мера электрического смещения 172
§ 49. Ток смещения 173
§ 50. Теорема Максвелла 174
§ 51. Природа электрического смещения 176
§ 52. Пояснения к теореме Максвелла. Выводы из основной формулировки 177
§ 53. Математическая формулировка принципа непрерывности тока 179
§ 54. Механическая аналогия 181
§ 55. Непрерывность тока в случае электрической конвекции 182
§ 56. Сложные примеры непрерывности тока?! 185

Глава IV. Электрическое поле

§ 57. Связь электрического поля с электромагнитными процессами. Область электростатики. 190
§ 58. Закон Кулона и вытекающие из него определения и соотношения. 192
§ 59. Электродвижущая сила и разность потенциалов. Закон электродвижущей силы 200
§ 60. Электрическая деформация среды 204
§ 61. Линии смещения 204
§ 62. Трубки смещения 205
§ 63. Фарадеевские трубки 207
§ 64. Фарадеевская трубка и количество электричества, с нею связанное 208
§ 65. Вторая формулировка теоремы Максвелла 209

§ 66. Электризация через влияние. Теорема Фарадея 210
§ 67. Энергия электрического поля 213
§ 68. Механические проявления электрического поля 216
§ 69. Преломление фарадеевских трубок 219
§ 70. Электроемкость и диэлектрическая постоянная 220
§ 71. Свойства диэлектриков 224

Глава V. Природа электрического тока

§ 72. Общие соображения о природе тока 231
§ 73. Движение электричества внутри проводников 234
§ 74. Участие электрического поля в процессе электрического тока 236
§ 75. Участие магнитного поля в процессе электрического тока 242

Глава VI. Прохождение электрического тока через газы и пустоту

§ 76. Общие соображения 249
§ 77. Ионы 250
§ 78. Ионизирующие агенты 252
§ 79. Заряд и масса иона 256
§ 80. Влияние давления газа на характер разряда 263
§ 81. Различные стадии прохождения тока через газы при атмосферном давлении 264
§ 82. Основные соотношения, характеризующие ток через газы 267
§ 83. Тихий разряд. Корона 274
§ 84. Разрывной разряд 277
§ 85. Вольтова дуга 281
§ 86. Дуговые выпрямители 291
§ 87. Различные стадии разряда через газы при малых давлениях 296
§ 88. Прохождение электрического тока через пустоту 298
§ 89. Пустотные электронные приборы 302
§ 90. Заключение 307

Глава VII. Электродинамика

§ 91. Основные положения Максвелла 308
§ 92. Вторая форма уравнений Лагранжа 314
§ 93. Выражение для кинетической энергии в обобщенных координатах 320
§ 94. Выбор обобщенных координат для электродинамической системы . 321
§ 95. Энергии Tm,Te,Tme 324
§ 96. Общее исследование сил, действующих в электродинамической системе 325
§ 97. Электрокинетическая энергия 337
§ 98. Электродвижущая сила самоиндукции 338
§ 99. Коэффициент самоиндукции 341
§ 100. Электродвижущая сила взаимной индукции 350
§ 101. Коэффициент взаимной индукции 352

§ 102. Связь между коэффициентами самоиндукции и взаимной индукции 356
§ 103. Общие выражения для магнитных потоков, сцепляющихся с отдельными контурами системы 360
§ 104. Общие выражения для электродвижущих сил, индуктируемых в отдельных цепях системы 361
§ 105. Роль короткозамкнутой вторичной цепи 362
§ 106. Действующие коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции 367
§ 107. Электромагнитная сила. Общие соображения 372
§ 108. Условия возникновения электромагнитной силы 377
§ 109. Случай сверхпроводящих контуров 381
§ 110. Случай контура с током во внешнем магнитном поле 385
§ 111. Основная роль бокового распора и продольного тяжения магнитных линий 387
§ 112. Случай прямолинейного проводника во внешнем магнитном поле 387
§ 113. Электромагнитные взаимодействия в асинхронном двигателе 389
§ 114. Величина и направление электромагнитной силы в случае одного контура с током 390
§ 115. Величина и направление силы электромагнитного взаимодействия двух контуров с током 394
§ 116. Случай электромагнитного взаимодействия любого числа контуров с током 396
§ 117. Электромагнитная сила, действующая на участок проводника с током, расположенный во внешнем магнитном поле 397

Глава VIII. Движение электромагнитной энергии

§ 118. Электромагнитное поле 400
§ 119. Основные уравнения электромагнитного поля 402
§ 120. Общий характер дифференциальных уравнений электромагнитного поля 408
§ 121. Распространение электромагнитной энергии. Плоская волна 409
§ 122. Скорость распространения электромагнитной энергии 414
§ 123. Опытные данные, подтверждающие теорию Максвелла 416
§ 124. Опыты Герца 419
§ 125. Механизм движения электромагнитной энергии. Вектор Пойнтинга 426
§ 126. Распространение тока в металлических массах. Поверхностный эффект 433
Приложение. Размерности электрических и магнитных величин 444
Предметный указатель 449

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ.

Настоящее издание повторяет почти без изменений второе издание. Внесены лишь некоторые мелкие исправления, и в качестве введения помещена речь, читанная мною в торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г., — „Основные воззрения современной физики". Содержание этой речи может быть рассматриваемо как добавочное разъяснение принятых мною в этом курсе принципиальных физических установок.

Август 1933 г.

В. Миткевич

.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ.

В связи с выпуском второго издания курса „Физические основы электротехники" я считаю полезным сказать несколько слов для того, чтобы разъяснить мотивы, руководившие мною как в отношении общего характера этого курса, так и в отношении его плана.

Что касается общего характера такой книги, как физические основы технической дисциплины, то, по моему мнению, целесообразно более или менее строгое проведение некоторой определенной точки зрения на природу физических явлений, с которыми мы имеем дело в данной дисциплине. Это не только желательно, но даже необходимо, ибо таким образом можно помочь изучающему связать в одно, до известной степени стройное целое, всю сумму получаемых сведений. В противном случае ему трудно будет сознательно оперировать на практике с приобретенными формальными знаниями, в особенности в случаях, когда приходится сталкиваться с обстановкой, несколько отличающейся от привычной, нормальной.

Я полагаю, что выбор общей точки зрения, которую следует принять как базу при изложении курса, естественно вытекает из некоторого анализа наших основных физических представлений. В этом отношении наиболее простой и надежный путь состоит в том, чтобы попытаться ответить на нижеперечисленные вопросы сформулированные применительно к преследуемой нами цели. Совокупность четких ответов на все эти вопросы в полной мере освещает сущность наших физических представлений.

Вопрос 1. Может ли физическое явление) протекать вне пространства и времени?

Вопрос 2. Может ли физическое явление протекать без всякого участия в нем какой-либо физической субстанции, представляющей собою носителя свойств, обнаруживаемых в явлении?

Вопрос 3. Может ли физическая субстанция не иметь пространственного распределения?

Вопрос 4. Может ли физическая субстанция в целом или отдельные ее части, сколь бы малы они ни были, не занимать никакого объема?

Вопрос 5. Можно ли рассматривать энергию как нечто, не являющееся ни самостоятельной физической субстанцией, ни каким-либо состоянием или свойством некоторой физической субстанции?

Вопрос 6. Может ли энергия (в том или ином ее понимании) не иметь пространственного распределения?

Вопрос 7. Может ли какая-либо физическая субстанция или энергия возникнуть в некотором объеме из ничего или превратиться в ничто?

Вопрос 8. Может ли физическая субстанция или энергия возникнуть в объеме, в котором их не было, или прекратить существование в объеме, в котором они перед тем были, иначе, как путем пространственного перемещения извне внутрь этого объема или изнутри этого объема наружу?

Вопрос 9. Может ли некоторое тело (например, наэлектризованное) притти в движение в связи с приближением к нему другого тела (также, например, наэлектризованного), если при этом энергия ни в каком виде не притекает извне в объем, занимаемый первым телом?

Вопрос 10. Может ли точка зрения „actio in distans", т. е. „действия на расстоянии", рассматриваться не как математический метод, пригодный для формального описания какого-либо физического явления, а как основное воззрение, имеющее непосредственное отношение к существу физического явления?

Ответы на вышеперечисленные 10 вопросов предопределяют собою те принципиальные точки зрения, с которыми мы подходим к изучаемым физическим явлениям.

Ответ „да" на любой из 10 вопросов или недостаточно категорический ответ „нет" хотя бы на один из этих вопросов неизбежно приводит нас к допущению действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. Отсюда берет начало один из путей рассмотрения природы явлений. Отсюда же может, между прочим, проистекать и представление о реальном физическом мире как о пространстве, в котором соответственным образом распределены материальные точки, векторы сил и тому подобные, по существу, формально-математические символы. Ньютон широко пользовался точкой зрения действия на расстоянии при математическом рассмотрении явлений тяготения, но он считал ее совершенно неприемлемой и просто абсурдной в применении к анализу того, что происходит в действительности (см. § 1 настоящей книги). О. Д. Хвольсон в томе I своего Курса Физики в следующих словах выражает мнение по этому же поводу: „Термином „actio in distans", т. е. „действие на расстоянии", обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие..."

Категорический и безоговорочный ответ „нет" на все 10 вопросов приводит нас к утверждению, что какие бы то ни было взаимодействия в природе совершаются не иначе, как при непосредственном участии среды, окружающей действующие друг на друга физические центры или физические системы. В области явлений магнитных и электрических мы таким путем приходим к фарадее-максвелловской точке зрения, которая и проводится в настоящем курсе с возможно большей последовательностью. Здесь, конечно, нет никакого противоречия тому, что понятия и термины, вытекающие из точки зрения действия на расстоянии, мы используем в математических формулировках и выводах, когда это оказывается практически целесообразным, подобно, например, мнимым количествам, которые мы применяем, между прочим, в теории переменных токов.

Итак, я считаю точку зрения фарадее-максвелловскую единственно приемлемой в самом широком смысле этого слова; точку же зрения действия на расстоянии рассматриваю как допустимую только в области формально-математических построений.

Совершенная непримиримость этих двух точек зрения в отношении анализа природы магнитных и электрических явлений в полной мере выявилась во время трех диспутов о природе электрического тока, имевших место в 1930 году в стенах Ленинградского Политехнического Института (см. стенографический отчет в журнале „Электричество", 1930, №№ 3, 8, и 10). Вышеперечисленные 10 вопросов явились именно результатом этих диспутов и сформулированы мною с целью возможно глубже вскрыть истинные корни обнаружившихся разногласий.

Переходя к вопросу о принятом мною расположении материала, я полагаю, что центром тяжести курса „Физические Основы Электротехники" должно быть рассмотрение свойств электромагнитного комплекса вообще и того электромагнитного явления, которое мы называем электрическим током, в частности. Магнитное и электрическое поля, как таковые, являются лишь отдельными сторонами всякого электромагнитного комплекса, и изучение их следует, по моему мнению, вести в том порядке, который определяется их относительным значением в явлении электрического тока. Поэтому я и начинаю курс с рассмотрения физических свойств магнитного потока. Действительно, мы можем представить себе электрический ток в цепи при полном отсутствии электродвижущей силы, при отсутствии электрических сил в объеме проводника и каких бы то ни было разностей потенциалов между отдельными его сечениями, при отсутствии, наконец, обычного течения электронов в объеме проводника. Я имею в виду случай постоянного тока в сверхпроводящей цепи, т. е. при $r=0$, когда все точки проводника имеют один и тот же потенциал и когда значения магнитной силы во всех точках внутри проводника строго сохраняются такими же, какими были до возбуждения тока в сверхпроводящей цепи (последнее вытекает из теории Максвелла).

Единственным, неизменным и безусловно всегда наблюдаемым признаком электрического тока является его магнитный поток самоиндукции. Представить себе электрический ток, не связанный с магнитным потоком, мы абсолютно не в состоянии. Быть может, даже наши обычные представления об электрическом токе, отраженные и в исторически сложившейся терминологии, ошибочны, как это

именно и предполагал Фарадей. Электрокинетическая энергия тока, протекающего по некоторой цепи, никоим образом не может быть подсчитана, если мы будем иметь дело только с объемом проводника. Наоборот, эта энергия полностью определяется путем рассмотрения того процесса, который совершается, вообще говоря, вне проводника, и она в точности равна как раз магнитной энергии потока самоиндукции.

Сказанного, я полагаю, достаточно для обоснования принятого мною плана расположения материала в настоящем курсе. Можно добавить еще лишь следующее.

Обширная область электромеханики, интересы которой я особенно имел в виду, является по существу областью практических приложений физических свойств магнитного потока. Именно магнитный; поток играет роль основного фактора во всех электромеханических устройствах, и при всех расчетах, к ним относящихся, мы оперируем с магнитным потоком, а не с электронами, текущими в объеме проводника в случае сопротивления, не равного нулю. Не приходится говорить об электронной теории коммутации динамомашин, так как таковой не существует и едва ли было бы рационально пытаться ее создать. Было бы шагом назад, если бы мы стремились построить теорию расчета электрических генераторов и трансформаторов с электронной точки зрения и т. д.

Нельзя игнорировать и того, что самое представление об электроне претерпевает в настоящее время эволюцию. Электрон уже не мыслится как некоторый элементарный электрический шарик строго ограниченного диаметра: электрон теперь расплывается в окружающем пространстве и приобретает все более и более определенный характер какого-то элементарного электромагнитного комплекса. Мы наблюдаем в науке здоровые симптомы грядущей увязки формальных и фактических достижений электронной теории с фарадее-максвелловской точкой зрения.

В настоящем дополненном и пересмотренном издании устранен тот основной пробел, из-за которого в первом издании на заглавной странице значилось: „часть первая". Именно, я ввел теперь главу, посвященную прохождению электрического тока через газы и пустоту. Из числа других изменений можно отметить выделение в особый параграф основных положений, касающихся преобразований магнитного потока.

В заключение считаю долгом поблагодарить друзей, своими ценными советами оказавших мне содействие при исправлении замеченных недочетов в старом издании. Особенно много помогли мне в этом отношении профессор П. Л. Калантаров и преподаватели ЛЭМИ — Е. Я. Семичев, Л. Р. Нейман и А. Г. Лурье. Наконец, выражаю свою признательность Техническому Директору Издательства КУБУЧ Л. М. Сафроновичу за его заботы о техническом оформлении и скорейшем выпуске настоящего курса.

В, Миткевич. **Декабрь 1931 г.**

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ.

Автор предполагает, что читатель в достаточной мере знаком с учением о магнитных и электрических явлениях в объеме общего Курса Физики, обычно преподаваемого в высших технических школах. Однако, с целью облегчить чтение книги, в параграфах 2 и 58 даны краткие сводки основных определений и соотношений из данной области. С тою же целью в конце книги, в особом приложении, приведены данные о физических размерностях величин, характеризующих электромагнитные процессы.

Книга эта представляет собою результат записи лекций, читанных мною в Ленинградском Политехническом Институте имени М. И. Калинина в течение ряда последних лет по курсу, который вначале назывался „Специальным Курсом Электричества", а затем „Теоретическими Основами Электротехники, ч. I". Запись с большою тщательностью повторно велась моими слушателями Е. А. Чернышевой, Е. Я. Семичевым и К. С. Стефановым. Составленные ими записи были просмотрены моим коллегой — преподавателем Политехнического Института П. Л. Калантаровым и, наконец, окончательно проредактированы мною. Выражаю мою большую благодарность всем упомянутым лицам, оказавшим весьма существенную помощь в деле подготовки настоящего курса к печати.

Вместе с тем очень благодарю и моего слушателя Б. Б. Таунлея за его общее содействие по организации издания курса, а также за работу по составлению рисунков для этой книги.
В. Миткевич. Август 1927 г.

[1]) Во избежание ненужных в данном случае философских рассуждений на тему о том, что именно мы разумеем под термином „физическое явление" условимся иметь в виду явления, о которых трактует, например, многотомный Курс Физики О. Д. Хвольсона.

§ 126. Распространение тока в металлических массах. Поверхностный аффект.

В предыдущих параграфах настоящей главы были обследованы общие законы распространения электромагнитной энергии. Остановимся теперь на более детальном рассмотрении процесса движения энергии в проводящей среде после того, как энергия вошла в эту среду из диэлектрика.

Изучение происходящих при этом явлений особо интересно потому, что, как опыт показывает, при распространении переменного тока в металлических массах наблюдаются уклонения от обычных законов распределения тока по сечению проводника: именно, в то время как при постоянном токе плотность его по всему сечению проводника равномерна, при переменном токе, особенно при высоких частотах, замечаются значительные отступления от этой

равномерности, причем, чем дальше от поверхности проводника, тем меньшей оказывается плотность тока, и тем больше ток отстает по фазе от напряжения. Это явление — неравномерное распределение тока по сечению проводника—получило название *поверхностного эффекта.*

В силу поверхностного распределения тока, активной частью проводника, „несущей" ток при высоких частотах, является только более или менее незначительная его доля, прилегающая к наружной поверхности. Части проводника, более близкие к его оси, оказываются при этих частотах почти лишенными тока и не принимающими, практически, участия в электрокинетическом процессе. Все происходит так, как будто проводник не представляет собою сплошной массы, а является полым внутри. Если вспомнить, что сопротивление проводника находится в обратно-пропорциональной зависимости от площади его поперечного сечения, при чем предполагается, что все это сечение пронизывается электрическим током, то станет ясно, что уменьшение активной части сечения проводника эквивалентно увеличению его омического сопротивления. Чем выше частота, тем меньшая часть поперечного сечения проводника оказывается нагруженной током, тем больше, стало быть, действующее омическое сопротивление этого проводника.

Необходимо здесь отметить, что при таких условиях, т. е. при явлении поверхностного распределения тока, внутренняя, т. е. прилегающая к оси часть проводника оказывается совершенно бесполезной и лишь удорожает стоимость проводки, так как увеличивает количество затраченного металла. Поэтому в установках, работающих при таких высоких частотах, при которых явление поверхностного эффекта уже резко выражено, часто употребляют или полые проводники, или же проводники, составленные из очень большого числа тонких изолированных проволочек, благодаря чему достигается значительное увеличение полезной поверхности проводника при данном его сечении.

При изучении всякого явления бывает полезно составить себе, для уяснения механизма явления, более или менее простую рабочую схему, помогающую связать происходящее явление с какими-либо конкретными и знакомыми представлениями. В качестве такой схемы для данного случая можно предложить следующее. Мы можем представить себе всякий проводник состоящим из ряда цилиндрических коаксиальных элементов малого сечения, расположенных вокруг его оси. Не трудно убедиться, что элементы, расположенные у периферии проводника, связаны с меньшим магнитным потоком, чем элементы, лежащие внутри проводника. В самом деле, в то время как с первыми связан лишь магнитный поток, наводящийся вне проводника, магнитный поток, связанный с внутренними элементами, больше на величину потока, распределенного внутри металла. При переменном токе, связанный с током магнитный поток является также переменным. Всякое же изменение магнитного

потока связано с возникновением в проводнике обратной ЭДС. На основании только что сказанного, мы должны притти
434

к заключению, что во внутренних элементах провода будет индуктироваться большая обратная ЭДС, чем во внешних. Влияние этой обратной ЭДС сказывается, во первых, в ослаблении силы тока и, во-вторых, в появлении разности фаз между током и напряжением. По приведенной схеме оказывается совершенно ясным, что внутренние элементы проводника, как связанные с большим магнитным потоком, представят большее полное сопротивление (z) и обусловят больший сдвиг тока по фазе.

Перейдем теперь к математическому обследованию вопроса. Обратимся к уже известный нам уравнениям Максвелла в той их форме, которую можно применить к случаю проводникового тока, именно, возьмем уравнения, связывающие силу тока с силою магнитного поля (см. § 119):

$$\left.\begin{aligned} 4\pi J_x &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ 4\pi J_y &= \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ 4\pi J_z &= \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{aligned}\right\} \qquad (154)$$

Будем здесь рассматривать J_x, J_y и J_z как составляющие плотности чисто проводникового тока. При этом, вообще говоря, плотность тока J является функцией геометрических, координат и времени, т. е:

$$\begin{aligned} J_x &= f_1(x, y, z, t), \\ J_y &= f_2(x, y, z, t), \\ J_z &= f_3(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Возьмем первое из уравнений (154) и умножим обе его части на величину магнитной проницаемости μ. Так как мы предположим, что имеем дело со средой, для которой μ=const, и так как $B=\mu H$, т. е.:

$$\begin{aligned} B_x &= \mu H_x, \\ B_y &= \mu H_y, \\ B_z &= \mu H_z, \end{aligned}$$

то, вводя в правой части уравнения μ под. знак производной, получим:

$$4\pi\mu J_x = \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z}.$$

Возьмем производную от полученного уравнения по времени:

$$4\pi\mu \frac{dJ_x}{dt} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{dB_z}{dt}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{dB_y}{dt}\right). \qquad (155)$$

*

435

Но на основании второй группы уравнений Максвелла (136) имеем:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dB_z}{dt} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\\ -\frac{dB_y}{dt} &= \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\end{aligned}\right\} \qquad (156)$$

Составляющие же электрического поля E_x, E_y и E_z, в случае проводникового тока, представляют собою падение напряжения на длине в 1 *см* по направлению соответственной оси, т. е. мы имеем право написать:

$$\begin{aligned}E_x &= \rho J_x,\\ E_y &= \rho J_y,\\ E_z &= \rho J_z,\end{aligned}$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника. Следовательно, только что написанные уравнения (156) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{dB_z}{dt} &= \rho\frac{\partial J_x}{\partial y} - \rho\frac{\partial J_y}{\partial x},\\ -\frac{dB_y}{dt} &= \rho\frac{\partial J_x}{\partial z} - \rho\frac{\partial J_z}{\partial x}.\end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в уравнения (155), получим:

$$4\pi\mu\frac{dJ_x}{dt} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\frac{\partial J_x}{\partial y} - \rho\frac{\partial J_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\frac{\partial J_x}{\partial z} - \rho\frac{\partial J_z}{\partial x}\right) = \rho\left(\frac{\partial^2 J_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 J_y}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2 J_x}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 J_z}{\partial x\partial z}\right).$$

Прибавив и отняв от правой части равенства величину:

$$\frac{\partial^2 J_x}{\partial x^2}$$

получим следующее уравнение: (157)

$$4\pi\mu\frac{dJ_x}{dt} = \rho\left[\frac{\partial^2 J_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 J_x}{\partial z^2}\right] - \rho\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}\right].$$

Выражение:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z},$$

представляющее собою сумму частных производных по трем геометрическим координатам от составляющих плотности тока, равно нулю, что легко показать. Именно, возьмем группу уравнений

436

Максвелла (154) и, продифференцировав эти три уравнения соответственно по *x*, по *y* и по *z*, получим:

$$4\pi\frac{\partial J_x}{\partial x}=\frac{\partial^2 H_z}{\partial x\partial y}-\frac{\partial^2 H_y}{\partial x\partial z},$$
$$4\pi\frac{\partial J_y}{\partial y}=\frac{\partial^2 H_x}{\partial y\partial z}-\frac{\partial^2 H_z}{\partial x\partial y},$$
$$4\pi\frac{\partial J_z}{\partial z}=\frac{\partial^2 H_y}{\partial x\partial z}-\frac{\partial^2 H_x}{\partial y\partial z},$$

Сложим эти уравнения почленно. При этом правая часть уравнения даст нуль. Таким образом, получаем:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x}+\frac{\partial J_y}{\partial y}+\frac{\partial J_z}{\partial z}=0.$$

Итак, уравнение (157) принимает вид:

$$4\pi\mu\frac{dJ_x}{dt}=\rho\left(\frac{\partial^2 J_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 J_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 J_x}{\partial z^2}\right). \qquad (158')$$

Совершенно аналогичными рассуждениями можно получить два других уравнения:

$$4\pi\mu\frac{dJ_y}{dt}=\rho\left(\frac{\partial^2 J_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 J_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 J_y}{\partial z^2}\right), \qquad (158'')$$
$$4\pi\mu\frac{dJ_z}{dt}=\rho\left(\frac{\partial^2 J_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 J_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 J_z}{\partial z^2}\right). \qquad (158''')$$

Эти уравнения вполне определяют характер распределения тока в металлических массах, так как они связывают математически изменение тока во времени с изменением его по всем геометрическим координатам. По форме эти уравнения вполне тождественны уравнениям, определяющим течение теплоты вследствие теплопроводности. Отсюда непосредственно следует, что со стороны формальной проникновение токов внутрь массы металла совершается по тем же законам, что и проникновение тепла от нагретой поверхности внутрь тела. С целью общего исследования закона распределения электрического тока в массе проводника решим полученные уравнения (158) для простейшего частного случая. Пусть (рис. 191) по поверхности раздела *ABCD*, являющейся одновременно координатной плоскостью *YOZ*, существует равномерное распределение переменного тока.

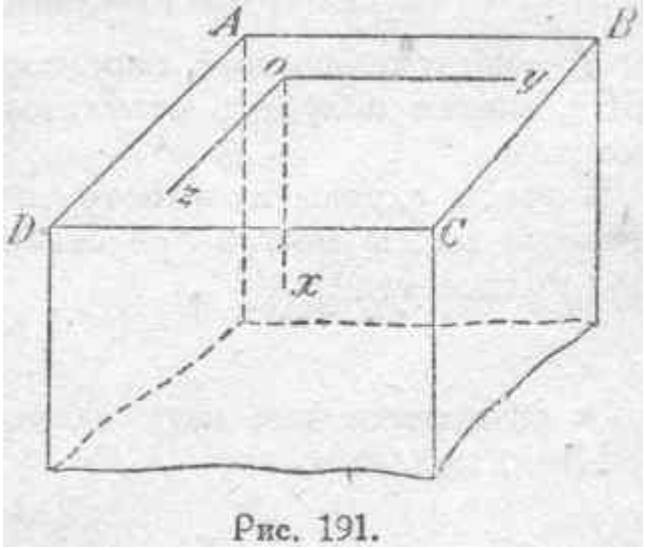


Рис. 191.

Ось *OX* направим вниз, т, е. в тело

проводника. Допустим далее, что этот переменный ток ориентирован в направлении параллельном оси *OZ,* Тогда будем иметь:

$J_x=0$

и

$J_y=0.$

Если поверхность раздела *ABCD, a* также и масса проводника, безгранично велики и, следовательно, нет причин для изменения ориентировки тока, то эта последняя на любой глубине будет одна и та же. На поверхности раздела плотность тока имеет вследствие равномерности распределения одно и то же значение для всех точек. Плотность тока J_z на любой глубине будет зависеть только от времени *t* и геометрической координаты *x*:

$J_z=f(t,x).$

При наличии же данного условия уравнение *(158''')* примет вид:

$$4\pi\mu\frac{dJ_z}{dt}=\rho\frac{\partial^2 J_z}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 J_z}{\partial y^2}=\frac{\partial^2 J_z}{\partial z^2}=0.$$

Для решения полученного уравнения примем дополнительное условие, а именно, предположим, что по поверхности раздела течет гармонически изменяющийся ток, определяемый некоторым выражением вида:

$$A\cos\omega t.$$

Здесь:

$$\omega=2\pi f,$$

где *f* — частота данного переменного тока. Придавая *f* любое значение, можем получить результат, соответствующий каким угодно частотам.

В таком случае плотность тока в любой точке внутри металлической массы можно представить вещественной частью комплексного количества:

$$ke^{j\omega t},$$

где ε, есть основание натуральных логарифмов, а $j=\sqrt{-1}$. Итак, полагаем:

$$J_z=ke^{j\omega t},\quad(159)$$

и подставляем эго значение для J_z в уравнение:

$$4\pi\mu\frac{dJ_z}{dt}=\rho\frac{\partial^2 J_z}{x^2},$$

438

не забывая только, что реальное значение плотности силы тока равно *вещественной* части данного комплекса. Произведя указанную подстановку, получим:

$$4\pi\mu\frac{d(ke^{j\omega t})}{dt}=\rho\frac{\partial^2(ke^{j\omega t})}{\partial x^2},$$

что дает по дифференцировании (если принять во внимание, что *k* зависит от *x:* и не зависит от *t*):

$$4\pi\mu kj\omega\varepsilon^{j\omega t}=\rho\,\varepsilon^{j\omega t}\frac{\partial^2 k}{\partial x^2},$$

или по сокращении на $\varepsilon^{j\omega t}$:

$$4\pi\mu k j\omega = \rho \frac{\partial^2 k}{\partial x^2}.$$

Вводя обозначение:

$$p^2 = \frac{4\pi\mu j\omega}{\rho},$$

приведем это уравнение к виду:

$$p^2 k = \frac{\partial^2 k}{\partial x^2}. \qquad (160)$$

' Решение полученного дифференциального уравнения (160) может быть написано в общей форме:

$$k = A_1 \varepsilon^{-px} + A_2 \varepsilon^{px},$$

где A_1 и A_2 постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий. A_2 должно быть равно нулю, так как если $A_2 \neq 0$, то при удалении исследуемой точки от плоскости раздела внутрь проводника, т. е. при возрастании координаты x, сила тока должна возрастать беспредельно, что противоречило бы закону сохранения энергии. Следовательно,

$A_2=0$

и решение уравнения (160) представится в виде:

$$k = A\varepsilon^{-px} \qquad (161)$$

Преобразуем это решение, для чего определим p. По условию:

$$p^2 = \frac{4\pi\mu\omega}{\rho} j,$$

следовательно,

$$p = \left(\frac{4\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} j^{\frac{1}{2}}.$$

Выражение $j^{1/2}$ представим в ином виде:

$$j^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{2} + j - \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

или:

$$j^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{j}{\sqrt{2}}\right) + \left(\frac{j}{\sqrt{2}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

или:

$$j^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{j}{\sqrt{2}}\right) = (1+j)\frac{1}{\sqrt{2}}.$$

В таком случае выражение для p примет вид:

$$p = \left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}(1+j) = a + ja.$$

Отсюда имеем для k на основании (161):

$$k = Ae^{-(a+ja)} = Ae^{-ax}e^{-ajx}.$$

Подставляя полученное решение в выражение для силы тока (159), получим:

$$J_z = Ae^{-ax}e^{-ajx}e^{j\omega t}$$

или:

$$J_z = Ae^{-ax}e^{j(\omega t - ax)},$$

а вспоминая, что реальное значение плотности тока выражается в данном случае вещественной частью комплекса, получим:

$$J_z = Ae^{-ax}\cos[\omega t - ax].$$

Подставляя сюда значение a:

$$a = \left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}},$$

получим окончательно:

$$J_z = Ae^{-\left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}x}\cos\left[\omega t - \left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}x\right]. \quad (162)$$

Полученное выражение показывает, что с изменением координаты x меняется и амплитуда и фаза тока. Подставляя значение

$x=0$

получим:

$$e^{-\left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}x} = 1,$$

что приводит нас, как и следовало ожидать, к уравнению:

$$J_z = A\cos\omega t,$$

т. е. к выражению для силы тока на поверхности раздела.

440

Нас интересует главным образом амплитуда плотности тока и потому мы в дальнейшем сосредоточим наше внимание исключительно на выражении:

$$J_m = Ae^{-\left(\frac{2\pi\mu\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}x}.$$

Разберем некоторые конкретные случаи. Остановимся, например, на меди, для которой $\mu=1$ и $\rho=1600$; подставляем эти данные в выражения для амплитуды при частоте f=100 периодов в секунду и, следовательно, при $2\pi f = 2\pi \cdot 100$.

Имеем:

$$\left(\frac{2\pi \cdot 2\pi \quad 1 \cdot 100}{1600}\right)^{\frac{1}{2}}x = \frac{2\pi.10}{40}x = \frac{\pi}{2}x.$$

Таким образом, ток пропорционален $\varepsilon^{-\frac{\pi}{2}x}$. Примем начальные условия такими, чтобы при $x=0$, т. е. поверхности раздела, было;
$J_m=A=1$.
В таком случае будем иметь:

при $x=1$ см значение амплитуды плотности тока $J_m=0{,}208$
„ $x=2$ см „ „ „ „ $J_m=0{,}043$
„ $x=4$ см „ „ „ „ $J_m=0{,}002$

Если же, например, $f=10^6$ периодов в секунду, то получим:

при $x=0$ . . . . . $J_m=1$
„ $x=0{,}01$ см . . . . . $J_m=0\,208$
„ $x=0{,}1$ см . . . . . $J_m<\frac{1}{6}10^{-6}$.

Отсюда вытекает вывод очень важный для техники токов большой частоты: в случае частот порядка миллионов в секунду, практически можно не считаться с токами, циркулирующими в глубине проводника.
Для железа, принимая $\rho=10000$ и $\mu=1000$, получаем при $f=100$ следующие результаты:
$J_m=\varepsilon^{-20x}$
и, следовательно,

при $x=0$ . . . . . $J_m=1$
„ $x=0{,}1$ см . . . . . $J_m=0{,}13$
„ $x=0{,}5$ см . . . . . $J_m<0{,}5\cdot 10^{-8}$

441

Если же принять $f=10^6$, то $J_m=eps^{-2000x}$ и получаем:

при $x=0$ . . . . . $J_m=1$
„ $x=0{,}001$ см . . . . $J_m=0{,}13$
„ $x=0{,}01$ см . . . . $J_m=0{,}2\cdot 10^{-8}$.

В. Томсон (лорд Кельвин) назвал явление, нами рассмотренное, явлением поверхностного эффекта, —skin-effect (skin=шкурка, пленка, слой). Как пример ко всему вышеизложенному, рассмотрим следующее. Предположим, что мы имеем некоторый обычный проводник. При прохождении по нему переменного тока мы будем наблюдать то же явление skin effect'a, которое выше было математически обследовано для простейшего случая. Благодаря этому, омическое сопротивление проводника переменному току r_a будет больше омического сопротивления току постоянному r_c. Это неравенство сопротивлений является, как выше было разъяснено, результатом неодинаковой плотности тока в различных слоях проводника, т. е. тем, что не все части проводника одинаково полно использованы для проведения тока.
Вопрос об увеличении сопротивления проводника при прохождении по нему переменного тока занимал, кроме В. Томсона, еще лорда Рэлея, Ми, Госпиталье и других. Точное математическое решение задачи для случая обычного проводника с круговым сечением приводит к сложным выкладкам, и мы поэтому ограничимся только результатами, пригодными для простых вычислений.

Приводим выборку из таблицы, составленной Госпиталье для меди на основании расчетов и опытов В. Томсона.

fd^2	$\frac{r_a}{r_c}$	fd^2	$\frac{r_a}{r_c}$
0	1,0	470	1,1747
20	1,0000	1200	1,6778
80	1,0001	2200	2,2190
170	1,0208	17000	5,5732
300	1,0805	30000	7,3250

Из таблицы непосредственно видно, как изменяется сопротивление медного проводника при изменении его диаметра *d* или частоты переменного тока /. На практике, в технике низких частот, частота редко превышает 50 — 60 периодов в секунду; диаметр проводников обычно сравнительно редко делают более 1—$1^1/_2$ *см*. Поэтому величина fd^2 обычно не превышает $60*1{,}5^2=135$. Следовательно, r_a почти не отличается от r_c, Но в области радио, где применяются большие частоты, r_a значительно превосходит r_f Что касается железных проводов, то уже

442

при низких частотах, вследствие более высокой магнитной проницаемости, происходит значительно большее увеличение сопротивления, чем для медных проводов. Учет явления при железных проводах очень осложняется тем, что μ непостоянно и, кроме того, сказывается на r_a влияние гистерезиса.

В последние годы в качестве материала для проводов начали употреблять еще алюминий (передача энергии и т.д.). Алюминиевые проводники более выгодны в отношении явления неравномерного распределения тока, чем медные, вследствие того, несомненно, что их проводимость почти вдвое меньше таковой же у медных. Ниже мы даем еще одну таблицу для сравнения процентного увеличения сопротивления для алюминиевых и медных проводников.

Материал / ам ıρ	Алюминий			Медь		
Частота =	25	50	100	25	50	100
d = 0,5 *см*	0,0009%	0,004%	0,016%	0,003%	0,011%	0,044%
1,0 „	0,015 %	0,06 %	0,25 %	0,04 %	0,18 %	0,70 %
1,5 „	0,08 %	0,3 %	1,3 %	0,20 %	0,88 %	3,5 %
2,0 „	0,02 %	1,0 %	4,0 %	0,70 %	2,8 %	11,2 %

Явление skin-effect'a имеет место между прочим и в проводниках машин переменного тока: в данном случае сопротивление также увеличивается. Необходимо оговориться еще, что там это явление осложняется появлением токов Фуко в проводниках вследствие перемещений проводников в неравномерных полях (причина, почему проводники нередко расслаиваются).

443

[1]) ***Так как, вообще,*** $\varepsilon^{jz} = \cos\alpha + j\sin\alpha.$

[1]) ***При этом мы меняем порядок дифференцирования, т. е. берем сначала производную по y, а затем по t. Как известно, на результат это не влияет.***

ГЛАВА I. Магнитный поток.

§ 1. Общая характеристика магнитного поля.

Фарадей, один из творцов современного учения об электрических и магнитных явлениях, своими открытиями и опытными исследованиями, а также глубоким анализом этих явлений вложил физическое содержание в наши представления о том, что происходит в магнитном поле. Основная идея, руководившая Фарадеем во всех его работах и составлявшая, так сказать, неизменный фон его научного мышления, заключалась в том, что все взаимодействия, наблюдаемые в природе вообще, а следовательно, и взаимодействия электрического или магнитного характера, могут осуществляться не иначе, как при непременном участии той среды, которая находится между взаимодействующими телами и окружает их. Мысль об этом постоянно привлекала к себе внимание Фарадея. Он совершенно не допускал возможности руководствоваться идеей действия на расстоянии при изучении и объяснении каких бы то ни было явлений природы. В своих рассуждениях он неоднократно ссылался на авторитет Ньютона, который имел по этому поводу совершенно определенное мнение, выраженное, между прочим, однажды следующим образом: „Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другими на расстоянии через *пустоту*, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим постоянно согласно известным законам; но представляет ли собою этот агент что-либо материальное или нематериальное, это я предоставляю усмотрению моих читателей". (Третье письмо Ньютона к Бентли). Будет весьма уместно здесь же указать, что Кулон, который сформулировал на основании

32

своих экспериментов законы электрических и магнитных взаимодействий, по внешнему виду очень напоминающие ньютоновский закон тяготения, вовсе не склонен был видеть в установленных им математических соотношениях нечто большее, чем простое средство, дающее возможность описать и подвергнуть математическому анализу некоторые проявления электрических и магнитных полей, В одном из своих мемуаров он говорит: „Из этих экспериментов следует, что, *какова бы ни была причина магнитных явлений* , все эти явления могли бы быть истолкованы к подвергнуты анализу при посредстве допущения, что в стальных пластинках или в их молекулах находятся две магнитных жидкости, причем частицы каждой такой жидкости взаимно отталкиваются пропорционально их плотности и обратно пропорционально квадрату их расстояния и притягивают частицы другой жидкости в том же отношении...".

Совершенно подобно тому, как при изучении вопросов тяготения, вопреки взглядам самого Ньютона, с течением времени идея действия на расстоянии стала рассматриваться отвечающей сущности вещей, точно так же и в науке об электрических и магнитных явлениях сильно развившийся на основе законов Кулона формально-математический метод описания и анализа различных свойств электрических и магнитных полей привел к аналогичным результатам: мало-по-малу в этих формальных достижениях стали видеть объяснение того, что происходит в действительности. И в то время, когда представления Фарадея о роли и значении промежуточной среды в области электромагнитных явлений приобрели уже законченность, в полной мере отразившуюся в ряде его опубликованных трудов, другие научные работники в той же области все еще игнорировали это и продолжали печатать трактаты, а которых развивалась точка зрения действия на расстоянии.

Как известно, Фарадей не пользовался обычными математическими символами в процессе своей работы и при описании достигнутых результатов. Максвелл перевел мысли Фарадея на привычный

всем математический язык и тем несомненно очень способствовал распространению его идей, ибо, благодаря увлечению чисто формальными методами исследования, мы нередко в значительной степени утрачиваем способность правильно воспринимать мысли, изложенные простым языком. Во введении к своему „Трактату об Электричестве и Магнитизме" Максвелл говорит, между прочим, следующее:

„Когда я стал углубляться в изучение Фарадея, я заметил, что его метод понимания явлений также математичен, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я также нашел, что этот метод может быть выражен в обычной математической форме и, таким образом, может быть сопоставлен с методами признанных математиков".

„Например, Фарадей своим мысленным оком видел «иловые линии, проходящие по всему пространству, там, где математики

33

видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел промежуточную среду там, где они ничего не видели, кроме расстояния. Фарадей искал сущность явления в том, что в действительности происходит в среде; другие удовлетворялись тем, что находили эту сущность в способности действия на расстоянии, которою одарены электрические жидкости".

„Когда я перевел то, что я рассматривал, как фарадеевскне идеи, в математическую форму, я нашел, что в общем результаты обоих методов совпадают, так что одни и те же явления учитываются обоими этими методами, и они приводят к одним и тем же законам действия..."

„Я нашел также, что некоторые из наиболее плодотворных методов исследования, открытых математиками, могут быть много лучше выражены в терминах, вытекающих из идей Фарадея, чем в их оригинальной форме".

Приведенные слова Максвелла интересны прежде всего в качестве весьма авторитетного свидетельства о том, что метод Фарадея приводит во всем к совершенно точным результатам. Дальнейшее развитие фарадее-максвелловского учения вполне это подтверждает. Сверх того, для нас важно отметить, что по существу нет никаких противоречий между тем, что говорит Фарадей и что непосредственно вытекает из его идей, и тем, что мы можем получить путем чисто формальным, исходя из основных законов Кулона и органически связанных с ними других законов электрического и магнитного поля. Сущность же различия этих двух методов можно пояснить на следующем простом примере. Описывая при помощи закона Кулона механические взаимодействия, наблюдаемые в электрических и магнитных полях, мы оперируем с некоторым интегральным эффектом, являющимся результатом того процесса, который, по Фарадею, происходит в промежуточной среде. Фарадей, питавший глубокую антипатию к идее действия на расстоянии, рассматривал все эти притяжения к отталкивания, как проявления какого-то вынужденного состояния среды. По Фарадею, подобное действие одного центра на другой передается, вообще говоря, по кривым путям, которые он назвал *силовыми линиями* и которые в его окончательном представлении рисуются не как какие-то математические траектории, а как *физические силовые линии,,* т.-е. как линии, существующие в действительности, физически. По Фарадею, притяжение или отталкивание наэлектризованных тел или магнитных полюсов обнаруживается потому, что со стороны среды, окружающей взаимодействующие тела, эти последние по всей своей поверхности испытывают тяжения. Суммарное, т.е. интегральное, действие этих тяжений мы и воспринимаем как силу кулоновского притяжения или отталкивания, в зависимости от характера распределения тяжений по поверхности. Таким образом, один метод, будучи чисто формальным, оперирует с внешним эффектом, обнаруживаемым в явлении, в фарадеевском же методе главным объектом внимания служит общая обстановка, при наличии которой и благодаря которой возникает рассматрива-

34

емое явление. Ясно поэтому, что *метод Фарадея должен приводить исследователя к более тесному контакту с тем, что в действительности происходит в природе.*

Итак, по существу, в отношении получаемых результатов нет никакого разногласия между двумя методами, обычно противопоставляемыми при изучении электрических и магнитных явлений. Ярким тому примером служит весь максвелловский „Трактат об Электричестве и Магнитизме", где достижения чисто формальной научной мысли нашли себе вполне достаточную оценку и приличное место. Было бы поэтому нецелесообразно воздерживаться от пользования формальными приемами там, где это упрощает описание и расчет, и если мы вместе с тем отдаем себе отчет в условности допущений, которые бывают нам необходимы для математических выводов. Так, нередко оказывается выгодным пользоваться представлением о магнитной массе, хотя таковой не существует на самом деле. Закономерное применение основных кулоновских допущений ни к каким недоразумениям привести не может. Вместе с тем есть много случаев, как, например, явления электромагнитной индукции, когда только фарадеевский метод описания и анализа явления дает нам возможность вести наши рассуждения просто, и, повидимому, в полном соответствии с действительной природой того, что происходит.

Выше мы упоминали уже, что Фарадей рассматривал „силовые линии" как нечто, играющее существенную) роль в тех явлениях, которые наблюдаются в электрическом и магнитном поле. К концу своей научной деятельности Фарадей все чаще и чаще возвращался к вопросу о реальном существовании силовых линий. Особенно много внимания он считал необходимым уделять *физическим силовым линиям магнитного поля,* т. е. тому, что мы в настоящее время мыслим как элементы магнитного потока. Количество и густота распределения „силовых магнитных линий" имеют, по Фарадею, большое значение, как обстоятельства, от которых зависит интенсивность всего того, что в магнитном поле происходит, например, интенсивность явления электромагнитной индукции тока. Физические силовые линии ведут себя, как упругие нити, они стремятся сократиться и взаимно отталкиваются, будучи расположены параллельно. Они *полярны,* т. е. обладают противоположными свойствами по противоположным направлениям.

В своих заключительных работах: „О физическом характере линий магнитной силы" и „О физических линиях магнитной силы", относящихся к 1852 году, Фарадей вновь подвергает весьма обстоятельному анализу все известные ему опытные факты и окончательно утверждается в мысли, что „силовые линии", которые мы можем себе представить в магнитном поле, обладают всеми признаками каких-то физических индивидуумов. В § 3297 первой работы Фарадей совершенно определенно ставит вопрос в следующих словах: „Что касается важного вопроса, подлежащего рассмо-

трению, то он заключается только в том, имеют **ли** линии магнитной силы *физическое существование* или нет". (Здесь курсив принадлежит самому Фарадею). В конце второй работы он дает ответ на поставленный вопрос и говорит, между прочим: „Итак, все эти факты и многие другие указывают на существование физических силовых линнй в пространстве, окружающем магнит, так же, как и внутри него".

На основании всего вышеизложенного мы, стремясь возможно ближе держаться взглядов Фарадея, будем представлять себе магнитное поле как пространство, по которому распределены „физические силовые линии", в дальнейшем нами называемые просто магнитными линиями. Все проявления магнитного поля мы будем рассматривать, как результат особых свойств магнитных линий.

Совокупность магнитных линий мы называем *магнитным потоком.* Таким образом, мы можем сказать, что *магнитное поле есть пространство, занятое магнитным потоком.*

[1]) Faraday, Experimental Researches in Electricity, Vol. III.

[1]) ***Курсив переводчика.***

§ 2. Основные определения и соотношения.

В настоящем параграфе мы даем сводку определений и соотношений, которыми обычно пользуются при количественном описании различных свойств магнитного поля или, иными словами, магнитного потока. Так как математическая теория магнитного поля развилась, как выше было указано, на почве приложений закона Кулона, то и вся относящаяся к этой области терминология в значительной степени проникнута условностями точки зрения действия на расстоянии. Последнее обстоятельство нисколько, конечно, не мешает понятиям, возникшим под влиянием этой точки зрения, быть весьма ценными при выводе различных математических зависимостей, и потому мы будем ими нередко пользоваться. Ограничимся следующими основными определениями и соотношениями:

а) Закон Кулона позволяет вычислить величину силы механического взаимодействия магнитных полюсов. Он гласит:

$$f = k \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 и m_2 суть *магнитные массы* полюсов, r есть расстояние между ними, *f*—сила механического взаимодействия, а *k* — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц и от свойств среды.

В абсолютной электромагнитной системе единиц принимают для пустоты численное значение коэффициента *k*, равное единице. Таким образом, *для пустоты закон Кулона* численно выражается следующим образом:

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Если все пространство, в котором наблюдается магнитное поле, заполнено *однородной и изотропной средой*, то в той же абсолютной электромагнитной системе будем иметь:

$$k = \frac{1}{\mu},$$

где μ есть так называемая *магнитная проницаемость* среды (см. пункт ж настоящего параграфа), являющаяся физической величиной, характеризующей свойства среды в магнитном отношении. Из сопоставления с предыдущим ясно, что для пустоты в абсолютной электромагнитной системе магнитная проницаемость равна единице. Магнитную проницаемость пустоты принято обозначать специальным символом μ_0 Таким образом, имеем:

$\mu_0=1$

Итак, *закон Кулона в общей форме для случая какой угодно однородной и изотропной среды* выражается так:

$$f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Для пустоты же точная формулировка закона Кулона получает следующий вид:

$$f = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

б) Единица магнитной массы или количества магнитизма, Рассмотрим случай пустоты и положим: $m_1=m_2=m$. На основании закона Кулона получаем:

$$m = r\sqrt{\mu_0 f}.$$

Примем теперь за единицу расстояния сантиметр, за единицу силы дину и допустим, что: *r*=1

и
f=1.
Кроме того, мы знаем, что:
μ_0=1.
Таким образом, имеем:
m=1.
Итак, абсолютная электромагнитная единица магнитной массы представляет собою такую магнитную массу, которая *в пустоте* взаимодействует с другою, равною ей, магнитною массою, находящеюся на расстоянии одного сантиметра, с силою в одну дину.
Отметим здесь же, что представление о магнитной массе является наиболее ярким примером тех условностей, с которыми
37

мы сейчас имеем дело. Как показал Фарадей (см. § 31), в действительности никаких магнитных масс не существует. Не существует также, следовательно, изолированных магнитных полюсов одного знака, и если мы говорим, например, о единице положительной (северной) магнитной массы или, как иногда называют, о единице положительного (северного) магнитизма и при этом оперируем с ней, как с чем-то совершенно обособленным и самостоятельным, то условность этого допущения всегда следует иметь в виду и пользоваться им можно только при чисто формальных выводах, а не в тех случаях, когда мы пытаемся сосредоточить внимание на действительно происходящих в магнитном поле явлениях.
в) Магнитная сила, или *напряженность магнитного поля (H) в* некоторой точке, есть отношение механической силы /, с которой поле действовало бы на северную (положительную) магнитную массу m, помещенную в рассматриваемой точке поля, к величине этой массы, причем предполагается, что внесение этой массы не изменяет общих условий, от которых зависит данное поле. Направление магнитной силы принимается совпадающим с направлением f. На основании определения можем, следовательно, написать:
$H=f/m$.
Из последнего равенства видно, что магнитная сила в данной точке численно равна механической силе, действующей в этом месте на единицу северного магнитизма. Магнитная сила есть вектор.
Единица магнитной силы в абсолютной электромагнитной системе называется *эрстедом,*
Вышеприведенные определения магнитной силы имеют совершенно общий характер. Во избежание недоразумений в отдельных частных случаях необходимо иметь в виду следующее. Данное определение *H* безоговорочно применимо в пустоте. Во всех других случаях надо прежде всего помнить, что магнитные массы должны быть выражены в единицах, определяемых соответственно взаимодействиям *в пустоте* (см., напр., предыдущий п. *б).* Следовательно, если в объеме, заполненном некоторой средой, находится магнитная масса, то для определения численного значения этой магнитной массы необходимо представить себе ее перенесенной из данной среды в пустоту. При соблюдении этого условия основное определение *H* в полной мере применимо к случаю однородной и изотропной среды. В случае же среды неоднородной, например, если мы имеем железный стержень, помещенный в магнитном поле, и хотим определить *H* в некоторой точке внутри железа, обыкновенно сводят дело к определению *H* в пустоте в некоторых эквивалентных условиях. Именно, представляют себе внутри железа беспредельно тонкую нитевидную выемку („пещерку первого вида") ограниченной длины, расположенную так, чтобы „наведенная" магнитная масса на внутренней поверхности пещерки была беспредельно мала. Под магнитной силой в железе в данной точке разумеют магнитную силу
38

внутри описанной воображаемой нитевидной пещерки, так образованной, чтобы рассматриваемая точка оказалась в пустоте, внутри этой пещерки. Таким образом, можем сказать, что магнитная **сила в** некоторой точке в общем случае какой угодно среды численно равна той механической силе, которая действовала бы в этой точке на единицу северного магнитизма, если бы обычное вещество перестало существовать в магнитном поле, но все магнитные массы, как образующие основное поле, так и *наведенные* на поверхности железа и других материалов, сохранились полностью.

г) Магнитным моментом (M) магнита называется произведение магнитной массы одного полюса магнита на расстояние между его полюсами.

д) Напряженностью намагничения (I) называется магнитный момент, приходящийся на единицу объема. Представим себе (рис. 3) в пустоте прямоугольный параллелепипед из некоторого магнитного вещества, с основанием s и длиной *l*, равномерно намагниченный в направлении ребер.

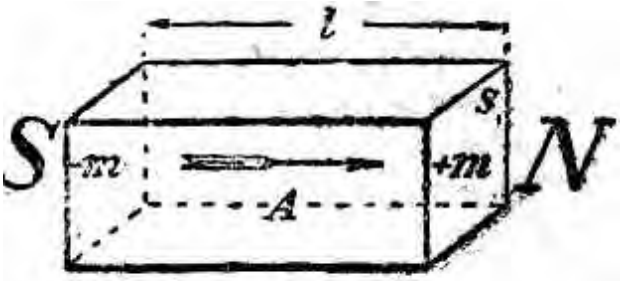


Рис. 3.

За направление напряженности намагничения *I* принимается направление от S к *N*, как показано на рисунке стрелкой. Такое именно направление для напряженности намагничения *I* необходимо избрать в связи с анализом опыта с „ломанием магнита", в данном случае — намагниченного параллелепипеда. Если обследовать поверхность средней его части, в промежутке между полюсами *N* и *S*, то на этой поверхности мы не обнаружим никаких магнитных масс. Если же разломать этот параллелепипед на две части по плоскости, проходящей через точку *A* перпендикулярно оси *NS*, каждая из частей окажется обладающей магнитными массами в месте излома, и эти новые магнитные массы будут в точности равны и противоположны одна другой и другим магнитным массам, принадлежащим соответственно той же части. Сблизив две половины намагниченного параллелепипеда так, чтобы в месте излома образовалась узкая щель, мы будем иметь в щели некоторую магнитную силу, определяемую наличием новых магнитных масс на плоскостях, ограничивающих щель. Направление этой магнитной силы будет именно такое, какое показано на рис. 3 стрелкой. Беспредельно уменьшая ширину щели, мы можем совершенно уничтожить внешнее проявление магнитных масс, образовавшихся на месте излома, т.-е. восстановить то, что было до излома. Характерное же направление, обусловленное магнитным состоянием вещества, остается неизменным. Его мы и должны принять за направление напряженности намагничения *I*, являющейся характеристикой этого магнитного состояния вещества. Если магнитное состояние вещества поддерживается под влиянием внешней магнитной силы, то принятое выше положительное направление напряженности намагничения совпадает с направлением этой внешней магнитной силы.

39

Допустим теперь, что количество магнитизма на каждом из оснований будет *m*. Тогда магнитный момент параллелепипеда будет.

$M=ml.$

Объем его будет:

$v=sl.$

Согласно определению имеем:

$$I = \frac{M}{v} = \frac{ml}{sl} = \frac{m}{s} = \sigma,$$

т.-е. напряженность намагничения *I* равна поверхностной плотности магнитизма σ на поверхности, перпендикулярной к напряженности намагничения, на границе с пустотой.

В пустоте, при отсутствии какого-либо вещества, наличие магнитной силы *H* свидетельствует о существования в пространстве какого-то особого магнитного процесса. Назовем его основным. Напряженность намагничения *I* характеризует то добавление к основному магнитному процессу, которое привносится веществом. Таким образом, для пустоты мы имеем всегда:

$I=0$.

Для вещества же, вообще говоря, мы имеем:

$I\neq 0$,

причем по абсолютной величине *I* изменяется в широких пределах

в зависимости от природы вещества и многих добавочных условий. Для диамагнитных материалов:

$I < 0$.

Для парамагнитных материалов:

$I>0$.

Для железа и других ферромагнитных материалов (см. главу II) *I* имеет сравнительно очень большие значения.

е) Магнитная индукция (B) есть величина, служащая мерой того магнитного процесса, который имеет место в пространстве, занятом магнитным полем. Все проявления магнитного поля зависят от интенсивности этого процесса. В случае пустоты связь между магнитной индукцией *B* и магнитной силой *H* выражают следующим образом:

$B=\mu_0 H$.

Такую же по форме связь между *B* и *H* принимают и в случае какого угодно вещества, заполняюшего пространство, занятое магнитным полем, а именно:

$B=\mu H$.

40

Соотношение, связывающее в общем случае магнитную индукцию *B* с магнитной силой *H* и напряженностью намагничения *I*, можно установить следующим образом. Рассмотрим некоторую точку А внутри тела, изображенного на рисунке 3. Допустим, например, что это тело есть кусок однородного железа соответствующей формы. Магнитная сила *H* в точке *A* определяется согласно п. *в* настоящего параграфа. Представим себе далее беспредельно узкую щель („пещерку второго вида"), внутри которой находится точка *A* и которая ориентирована перпендикулярно магнитной силе *H* и напряженности намагничения *I*. На внутренних поверхностях щели обнаружатся магнитные массы, поверхностные плотности которых обозначим через+σ и -σ. Если теперь поместим в точку *A* единичную магнитную массу, то она будет испытывать действие не только от основной магнитной силы *H*, но еще и со стороны магнитных масс, которые возникли благодаря образованию пещерки. Путем элементарного подсчета, пользуясь законом Кулона, можно показать, что помещенная в точке *A* единица магнитизма будет испытывать со стороны магнитных масс, расположенных на одной из двух поверхностей, ограничивающих беспредельно узкую щель, силу, равную

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot 2\pi\sigma \quad \text{или} \quad \frac{1}{\mu_0} \cdot 2\pi I.$$

В сумме магнитные массы, расположенные на обеих этих поверхностях, будут действовать на единичную магнитную массу в точка *A*

с силою, равною $1/\mu_0 \cdot 4\pi I$. Эта добавочная сила есть не что иное,

как именно проявление того, что привносит вещество, в данном: случае железо, в результирующий магнитный процесс, происходящий в точке *A*. Таким образом, полная магнитная сила *H'* внутри рассматриваемой пещерки будет слагаться из двух частей: основной
магнитной силы *H* и составляющей $(1/\mu_0)\cdot(4\pi I)$, привносимой магнитными состоянием вещества, т.-е.

$$H' = H + \frac{1}{\mu_0} \cdot 4\pi I.$$

Магнитная индукция *B* в пещерке, в которой мы имеем пустоту будет, согласно предыдущему, выражаться следующим образом:
$B=\mu_0 H'$.
Подставляя в это выражение значение H', получаем:

$$B = \mu_0 H + 4\pi I. \qquad (1)$$

Это и есть искомое соотношение, определяющее величину магнитной индукции *B* внутри вещества в зависимости от основной-магнитной силы *H* и напряженности намагничения *I*.
41

Магнитная индукция *B* есть вектор так же, как *H* и *I*. В среде однородной и изотропной направление вектора *B* совпадает с направлением вектора *H*.
В абсолютной электромагнитной системе единиц магнитная индукция измеряется в *гауссах*. В пустоте магнитной силе в один эрстед соответствует магнитная индукция в один гаусс. При наличии вещества численные значения магнитной силы и магнитной индукции могут быть весьма различны.
ж) Магнитная проницаемость (μ) и *магнитная восприимчивость* (χ). Разделив обе части соотношения (1) на *H*, мы получим:

$$\frac{B}{H} = \mu_0 + 4\pi \frac{I}{H}.$$

Имея в виду, что левая часть равенства представляет собою *магнитную проницаемость:*
$\mu=B/H$,
и вводя новую физическую величину—*магнитную восприимчивость:*
$\chi=I/H$, получаем:
$\mu=\mu_0+4\pi\chi$. (2)
Для пустоты в абсолютной электромагнитной системе принимается:
$\mu_0=1$

И

$\chi=0$. Для диамагнитных материалов:
$\mu<1$
и
$\chi<0$.
Для парамагнитных материалов:
$\mu>1$
и
$\chi>0$.
з) Теорема Гаусса. Рассмотрим прежде всего пространство, в котором нет обычной материи, т.-е. пустоту. Предположим, что магнитная масса *m* расположена в точке *O*, и пусть r будет расстояние некоторой точки *P* от точки *O*. Магнитная сила в точке *P*
будет направлена по линии *OP* и будет равна:

$$H = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m}{r^2}.$$

Проведем прямую линию из точки O по любому направлению в бесконечность. Представим себе теперь некоторую замкнутую поверхность S. Если точка *O* лежит вне этой замкнутой поверхности, проведенная прямая линия либо вовсе не пересечет поверхности, либо столько же раз пересечет поверхность, входя в нее, как и выходя из нее. Если же точка O находится внутри поверхности (рис. 4), прямая, идущая от этой точки, должна сначала выйти из поверхности и затем может произвольное число раз входить и выходить попеременно, но в конце концов выйдет из поверхности.

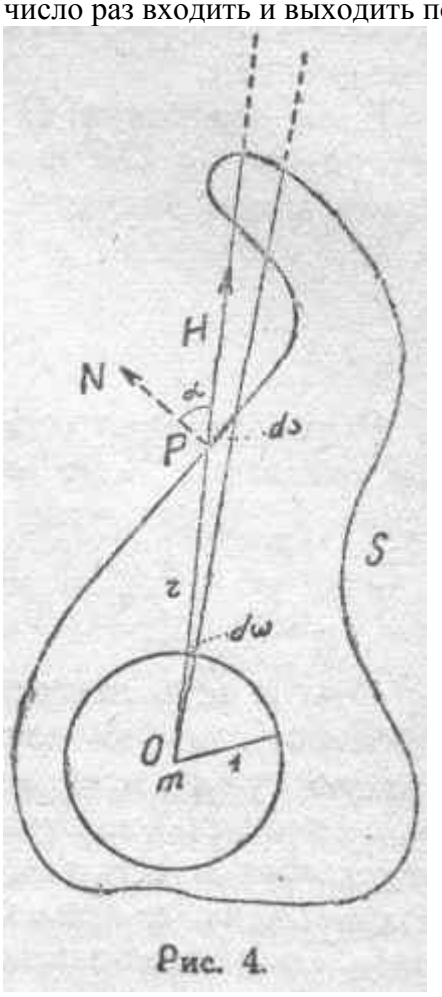


Рис. 4.

Пусть α будет угол между *OP* и внешнею нормалью *PN* к поверхности в той точке, где линия *OP* пересекает ее. В таком случае там, где эта прямая выходит из поверхности, cosα будет положителен, а там, где входит, cosα будет отрицателен.
Опишем теперь радиусом, равным единице, сферическую поверхность вокруг точки O, как центра, и пусть прямая *OP* опишет коническую поверхность, охватывающую малый телесный угол и имеющую вершину в точке *O*. Этот конус вырежет бесконечно малый элемент $d\omega$ из поверхности сферы и бесконечно малые элементы ds_1 ds_2 и т. д. из рассматриваемой замкнутой поверхности в различных местах, где линия *OP* ее пересекает. Тогда некоторый из этих элементов *ds* пересечет беспредельно тонкий конус на расстоянии *r* от точки *O* под наклоном, определяемым углом α, и мы можем написать:
$\cos\alpha ds = \pm r d\omega$.
Далее, так как:

$$H = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m}{r^2},$$

мы получаем:

$$H \cos\alpha \, ds = \pm \frac{1}{\mu_0} \cdot m d\omega,$$

причем положительный знак берется, когда прямая *OP* выходит из замкнутой поверхности, и отрицательный — когда она входит внутрь поверхности. ,

Если точка *O* находится вне замкнутой поверхности, число положительных значений равно числу отрицательных, так что для любого направления будет:

$$\Sigma H \cos\alpha \, ds = 0$$

и, следовательно:

$$\int_s H \cos\alpha \, ds = 0,$$

причем интегрирование распространяется по всей замкнутой поверхности.

Если же точка О расположена внутри замкнутой поверхности, радиус-вектор ОР сначала выходит из поверхности, давая этим положительное значение величине $md\omega$, а затем имеет равное количество вхождений и выходов, так что в этом случае:

$$\Sigma H \cos\alpha \, ds = \frac{1}{\mu_0} m d\omega.$$

Распространяя интегрирование по всей замкнутой поверхности, мы включим всю сферическую поверхность, величина которой равна 4π, так что:

$$\int_s H \cos\alpha \, ds = \frac{1}{\mu_0} \cdot 4\pi m.$$

Это и есть *теорема Гаусса для случая пустоты*.

Ясно, конечно, что под *m* мы можем подразумевать алгебраическую сумму всех магнитных масс, находящихся внутри некоторой замкнутой поверхности, ибо можем рассмотреть по очереди все отдельные массы так, как будто бы каждая из них существует только одна, и приложить к ним теорему Гаусса, а затем все сложить. Тогда под знаком интеграла получим нормальную составляющую результирующей магнитной силы, а множителем у 4π будет сумма всех магнитных масс, т- е. Σm.

В случае среды неоднородной и неизотропной, например, если в магнитном поле имеются постоянные магниты, части, из железа и т. п., в полной мере применима формулировка теоремы Гаусса, дан-

ная для пустоты, при условии такого определения магнитной силы *H*, как это было разъяснено в конце пункта *в* настоящего параграфа.

Если рассматриваемая замкнутая поверхность находится в пространстве, которое заполнено однородным и изотропным веществом с постоянной магнитной проницаемостью μ, то для некоторой точки *P* будем иметь:

$$H = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m}{r^2},$$

и теорема Гаусса для этого случая может быть представлена в виде:

$$\int_s H \cos\alpha \, ds = \frac{1}{\mu} \cdot 4\pi m.$$

Так выражается *теорема Гаусса для случая однородной и изотропной среды*.

При этом по существу игнорируются те дополнительные магнитные массы, которые „наводятся" (см. глава II, § 31) на границе соприкосновения среды и полюсов, несущих на себе основные магнитные массы, принимаемые во внимание в теореме Гаусса. Введением в правой части равенства множителя $1/\mu$, собственно говоря

достигается тот же результат, как если бы мы вообразили, что материальная среда отсутствует, но все магнитные массы, *в том числе и наведенные*, сохранились полностью.

Так как в последнем случае μ постоянно, то можем написать:

$$\int_s \mu H \cos\alpha \, ds = 4\pi m$$

или

$$\int_s B \cos\alpha \, ds = 4\pi m,$$

т. е. полная магнитная индукция сквозь любую замкнутую поверхность *в однородной и изотропной среде* равна 4π раз взятой магнитной массе, находящейся внутри этой поверхности.

В виду того, что в действительности магнитных масс нет, и нам только кажется, что мы их в том или другом случае наблюдаем, последнее выражение, дающее величину полной магнитной индукции сквозь замкнутую поверхность, надо понимать как чисто формальное соотношение, имеющее *совершенно условный характер*. Каково истинное значение этого интеграла во всякой реальной обстановке, об этом будет подробно сказано в ближайших параграфах (§§ 4, 5 и 6).

45

[1]) Так как при формальном изучении электрического поля также исходят из соответствующего выражения закона Кулона, выведенная для магнитного поля теорема Гаусса может быть распространена и на электрическое поле, но только вместо магнитной силы должна быть введена электрическая сила, вместо магнитной массы — количество электричества, и, наконец, вместо магнитной проницаемости — диэлектрическая постоянная.

[1]) Наличие коэффициента 4π во всех важнейших формулах учения об электрических и магнитных явлениях происходит от несколько неудачного построения системы единиц. Это неудобство было бы устранено, если бы в формулировке закона Кулона

$$f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

был введен в знаменателе множитель 4π. Мы получили бы тогда в знаменателе величину $4\pi r^2$, т. е. поверхность сферы, что имело бы определенный физический смысл, так как состояние среды, которое мы называем электрическим или магнитным полем и которое порождает механическую силу .f, распространяется во все стороны вокруг некоторого центра. Отсутствие множителя 4π в формулировке закона Кулона привело к появлению этого коэффициента во всех других соотношениях, связанных так или иначе с этим законом, причем

величина 4π, входящая в то или иное данное соотношение, играет в нем лишь роль численного множителя, ни в малейшей степени не связанного с физической сущностью этого соотношения. Английский физик Хивисайд пользовался в своих трудах системой единиц, в которой коэффициент 4π был исключен, но введение такой рациональной системы единиц в технику связано со столь большими практическими затруднениями, что приходится от него отказаться.

§ 3. Магнитный поток.

Представим себе произвольный замкнутый контур и некоторую поверхность s, ограничиваемую этим контуром. Полная магнитная индукция сквозь рассматриваемую поверхность *s*, т. е. поверхностный интеграл:

$$\int_s B \cos\alpha \, ds$$

называется *потоком магнитной индукции* или просто *магнитным потоком* сквозь поверхность *s* или сквозь контур, ограничивающий эту поверхность. Величину магнитного потока принято обозначать через *Ф*. Таким образом, можем написать:

$$\Phi = \int_s B \cos\alpha \, ds. \qquad (3)$$

В этом выражении мы имеем непосредственную связь между физической величиной, представление о которой вытекает из фарадеевской точки зрения на магнитное поле, т. е. между магнитным потоком, и понятиями, которые можно рассматривать как результат чисто формального анализа магнитного поля. Дальнейшее углубление в смысл соотношения (3) достигается проще всего в связи с представлением *о линии магнитной индукции*, которая изображает собою линию, так построенную в магнитном поле, что в каждой точке элемент этой линии совпадает по направлению с вектором магнитной индукции в данной точке. Общий характер расположения линий магнитной индукции в пустоте или в воздухе, как известно, очень наглядно иллюстрируется *магнитными спектрами*, получаемыми при посредстве железных опилков.

Трубчатая поверхность, образующими которой являются линии магнитной индукции, называется *трубкой магнитной индукции*. Пользуясь теоремой Гаусса, не трудно показать, что магнитный поток сквозь любое поперечное сечение трубки магнитной индукции есть величина постоянная, т.-е.

$\Phi = \text{const}$.

Единичной трубкой магнитной индукции называется такая трубка, для любого сечения которой имеем:

$$\Phi_1 = \int_s B \cos\alpha \, ds = 1. \qquad (4)$$

Ясно, что величина магнитного потока выражается числом единичных трубок магнитной индукции, входящих в состав этого потока.

То, что мы теперь называем единичной трубкой магнитной индукции, вполне соответствует содержанию идеи Фарадея о „фи-

зической силовой линии магнитного поля". В настоящее время этот старый фарадеевский термин не применяется. И вместо термина „единичная трубка магнитной индукции" мы, ради краткости и для связи с терминологией Фарадея, будем пользоваться термином *магнитная линия*, имея в виду ось

единичной трубки и оставляя при этом в стороне вопрос о том, каковы истинные поперечные размеры реально существующих нитеобразных элементов магнитного потока, о которых мыслил Фарадей.

Итак, магнитная линия является единицей магнитного потока. В качестве таковой она называется *максвеллом*. Максвелл есть единица магнитного потока в абсолютна и электромагнитной системе. В практической же электромагнитной системе за единицу магнитного потока принимается *прамаксвелл*, равный 10^8 максвеллов. Приставка „пра", послужившая при образовании наименования практической единицы магнитного потока, является первым слогом слова „практический".

В связи со всем вышеизложенным мы, следовательно, можем повторить данное в § 1 определение: *магнитный поток есть совокупность магнитных линий.*

Обратимся к вышеприведенному основному соотношению (3) и предположим, что элемент поверхности *ds* перпендикулярен вектору *B*. Беря производную от обеих частей этого соотношения по s, получаем:

$B=d\Phi/ds$.

Таким образом, *магнитная индукция есть не что иное, как плотность магнитного потока.* В однородном магнитном поле величина магнитной индукции равна числу максвеллов, приходящихся на один квадратный сантиметр поверхности, перпендикуляр-вой направлению магнитного потока.

В тех случаях, когда пользуются формальным представлением о магнитных массах, говорят, что магнитный поток исходит из северной (положительной) магнитной массы и заканчивается на южной (отрицательной) магнитной массе. На основании теоремы Гаусса мы можем утверждать, что из положительной магнитной массы, равной *m*, исходит поток в $4\pi m$ максвеллов, а из магнитной массы, равной +1, исходит поток, равный 4π максвеллов.

[1]) В среде однородной и изотропной линии магнитной индукции совпадают с так называемыми силовыми линиями магнитного поля.

§ 4. Принцип непрерывности магнитного потока. Опыты Фарадея.

Фарадею принадлежит *заслуга* установления очень важного принципа, соблюдающегося во всех случаях существования магнитного потока. Это — принцип замкнутости или непрерывности магнит-ных линий, непрерывности магнитного потока.

Всегда, когда мы имеем дело с магнитным потоком, каждая магнитная линия, его составляющая, и весь поток в целом пред-

47

ставляют собой замкнутый контур. В ряде случаев, когда магнитное

поле создается в воздухе или, вообще говоря, в среде, доступной наблюдению, мы легко можем убедиться в справедливости этого положения. Например, если мы имеем проводник с током (на рис.5 он взят перпендикулярным к плоскости чертежа), мы можем непосредственно убедиться, что магнитные линии представляют собою концентрические окружности с центром, лежащим на оси проводника.

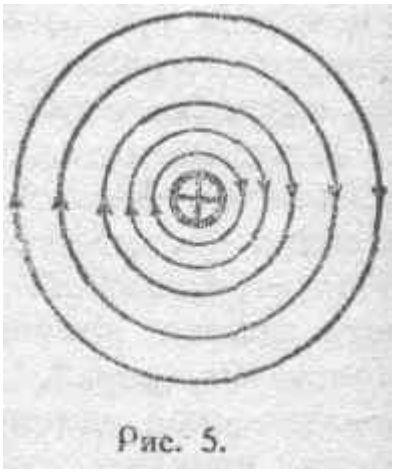


Рис. 5.

Сложнее обстоит дело в случае потока, связанного с телами, внутрь которых мы проникнуть не можем, например в случае потока, проходящего через железо, или потока, связанного с постоянным магнитом. Утверждать что-либо a priori мы не можем и должны поэтому подвергнуть поток внутри железа специальному обследованию. Фарадей первый это сделал. Хотя опыты его, сюда относящиеся, не кажутся теперь вполне убедительными, хотя мы теперь несколько иначе доказываем принцип непрерывности магнитного потока, но тем не менее будет чрезвычайно поучительно познакомиться с ходом мыслей Фарадея, этого величайшего экспериментатора, с его подходом к исследованию данного вопроса.

Первые опыты Фарадея, положенные в основу формулированного им принципа замкнутости магнитного потока, относятся к 1832 году. Позднее, лет через 20, он еще раз вернулся к этому вопросу и тогда окончательно сформулировал указанный принцип.

В этих опытах Фарадея, схематически здесь описанных, наиболее ярко выявляется сущность его идеи. Фарадей брал постоянный магнит цилиндрической формы (цилиндрической, чтобы при вращении магнита вокруг оси сохранялась геометрическая форма составленного им контура, в то время как вещество перемещалось бы). Над этим магнитом (рис. 6) он поместил диск *D* (из проводящего материала), к периферии которого прилегала щеточка. Другая ще-

48

точка касалась оси диска.

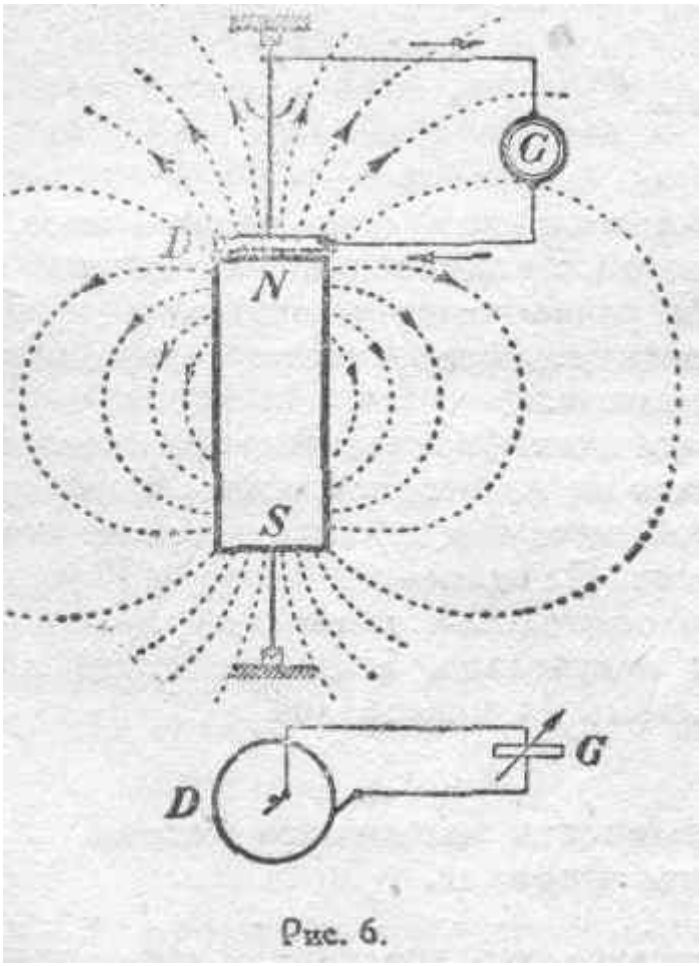


Рис. 6.

В цепь между щетками был включен гальванометр G. Фарадей прежде всего вращал один диск над неподвижным магнитом. При этом гальванометр давал отклонения, зависящие от скорости вращения диска; при перемене направления вращения показание гальванометра меняло свой знак. После этого Фарадей повторил свой опыт в следующем виде: он склеил диск с магнитом (посредством непроводящего материала) и стал вращать всю систему, как одно целое. К большому своему удивлению, он получил тот же эффект: при той же скорости вращения гальванометр давал то же отклонение; опыт приводил к заключению, что возникновение ЭДС в данном случае не зависит от того, вращается ли диск относительно магнита или нет.

Для более точной проверки полученного результата Фарадей решил повторить опыт, более полно утилизируя магнитный поток. Фарадей разнообразил обстановку опыта всевозможными способами. По существу дело можно свести к тому опыту, в котором он заменил диск металлическим стаканом. Расположение опыта показано схематически на рис. 7.

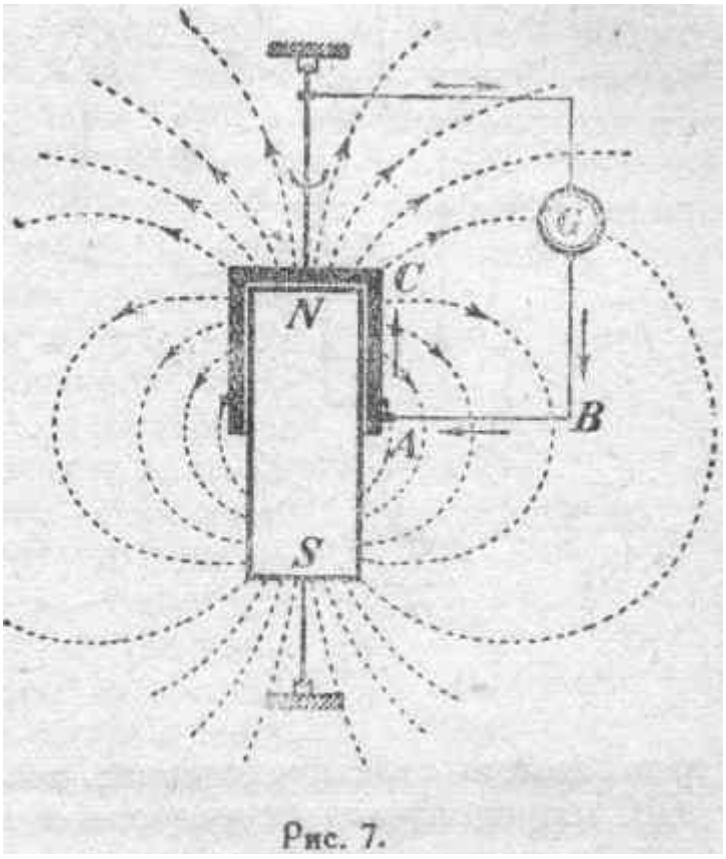


Рис. 7.

При вращении стакана *C* вокруг неподвижного магнита ЭДС должна была возникать за счет пересечения магнитных линий радиусами дна стакана и образующими цилиндрической его части, в результате чего в цепи гальванометра должен получаться электрический ток. И в данном случае, при склеивании Стакана с магнитом и вращении всей системы, величина и направление отклонения гальванометра получались те же самые, как если бы магнит был неподвижен, а стакан вращался один.

Если действительно все происходит в количественном и качественном отношении одинаково независимо от того, вращается ли стакан относительно магнита или нет, то естественно, кажется, сделать заключение, которое и сделал Фарадей, а именно, что при вращении магнита вокруг его геометрической оси магнитный поток остается в пространстве неподвижным, как бы будучи в отношении ориентировки связанным с некоторыми неподвижными мировыми координатными осями, а не вращается вместе с магнитом.

49

Возникает вопрос: если магнитный поток остается в пространстве неподвижным и если этот магнитный поток существует и внутри магнита, то элементы вращающегося магнита тоже режут магнитные линии, и, следовательно, в этих элементах должна индуктироваться ЭДС. Для проверки этого заключения Фарадей проделал третью серию опытов. В этих опытах он вращал только магнит, введенный

Возникает вопрос: если магнитный поток остается в пространстве неподвижным и если этот магнитный поток существует и внутри магнита, то элементы вращающегося магнита тоже режут магнитные линии, и, следовательно, в этих элементах должна индуктироваться ЭДС. Для проверки этого заключения Фарадей проделал третью серию опытов. В этих опытах он вращал только магнит, введенный в цепь при помощи двух контактов: одного — у поверхности магнита в нейтральной его зоне, другого — в центральной точке на оси магнита, как показано на рис. 8.

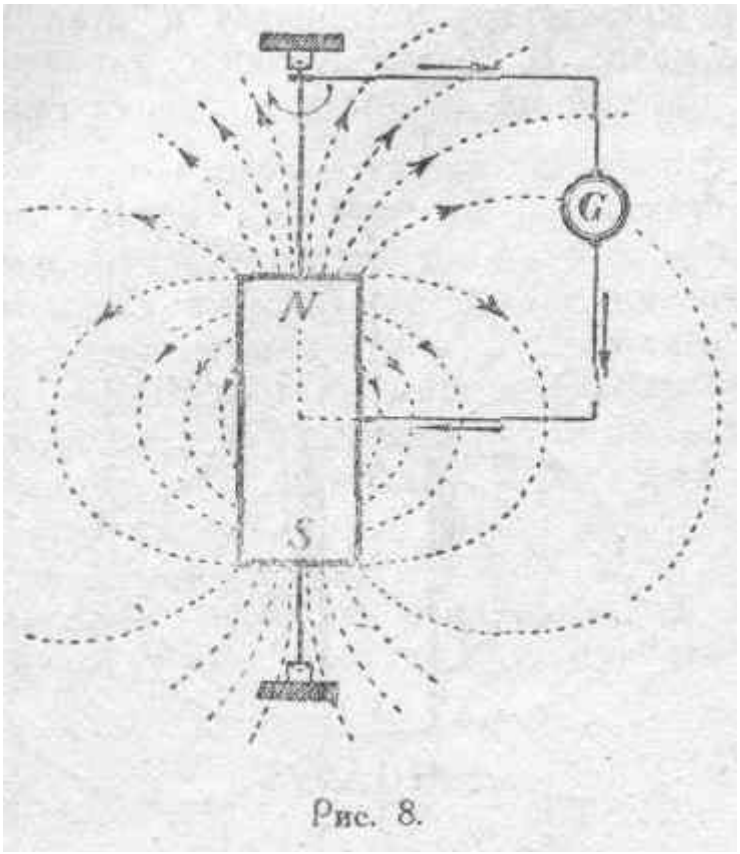


Рис. 8.

При вращении магнита получалось то же, что и в предыдущем опыте при вращении стакана. Этот результат можно объяснить только предположением, что число магнитных линий, пересекаемых за один полный оборот, осталось прежним, что, в свою очередь, возможно, по Фарадею, только в том случае, если *все магнитные линии замыкаются внутри тела магнита.* В самом деле, схематизируя путь тока внутри магнита, можно себе представить, что вся действующая в данном случае ЭДС определяется пересечением магнитных линий радиальным элементом тела магнита, лежащим под щеткой (не трудно убедиться, что, предполагая путь тока иным, мы получим тот же результат).

Таким образом, в результате своих опытов Фарадей пришел к заключению, что все магнитные линии, исходящие из северного полюса постоянного магнита и входящие в южный полюс, замыкаются внутри тела магнита, что и сформулировал следующим образом:

„Внутри магнита существуют (физические) силовые линии той же природы, как и вне его. Даже более того, количество внутренних линий строго равняется количеству внешних. Направление внутренних линий связано с направлением внешних, и, собственно говоря, внутренние линии составляют, продолжение внешних, имея совершенно ту же природу, насколько это можно исследовать опытом. Поэтому каждая (физическая) силовая линия, на каком бы расстоянии от магнита мы ее не взяли, должна быть рассматриваема, как замкнутый контур, проходящий некоторою своею частью через магнит и имеющий одинаковую активность в каждом месте на своем протяжении".

50

[1]) Faraday, Experimental Researches in Electricity, Vol. III, § 3117.

[1]) Здесь мы имеем, по существу, прообраз дисковой униполярной машины: радиусы диска „режут" магнитные линии, и в них индуктируется электродвижущая сила.

§ 5. Анализ опытов Фарадея.

Выше мы указали, что во время своих опытов по установлению принципа непрерывности магнитного потока Фарадей пришел к заключению, что, при вращении магнита вокруг его геометрической оси, магнитный поток, связанный с ним, остается в пространстве неподвижным (не вращается). Необходимо, однако, иметь в виду, что результаты опытов Фарадея, как указал Прэстон, могут быть истолкованы и с другой точки зрения. Прэстон разъяснил, что все явления, наблюдавшиеся Фарадеем, должны были бы иметь место и в том случае, если бы магнитный поток магнита был жестко связан с ним и вращался вместе с ним в пространстве.

Рассмотрим случай рис. 7 (применительно к тому опыту Фарадея, когда стакан склеен с магнитом). Допустим, что вращение происходит по часовой стрелке (если смотреть сверху). Фарадей предполагал, что неподвижные магнитные линии пересекаются элементами стакана, в результате чего получается ЭДС, численно равная числу пересечений в единицу времени. Рассматривая явление с точки зрения Прэстона, т. е. предполагая магнитный поток жестко связанным с магнитом и вращающимся вместе с ним, мы приходим к заключению, что элементы стакана не будут резать магнитных линий (не забудем, что стакан вращается вместе с магнитом). Но зато все магнитные линии в своем вращении будут пересекать неподвижные элементы электрического контура, т. е. проводники, составляющие внешнюю цепь между щетками. При атом скорость пересечения останется тою же самою. Следовательно, в этих проводниках будет индуктироваться ЭДС, по величине точно такая же. Легко показать, что и направление ЭДС точно так же останется неизменным. В самом деле: применим правило трех пальцев правой руки. В первом случае, считая поле неподвижным, получим (рис. 9) для бокового элемента стакана *AC*, имея в виду движение по часовой стрелке: направление движения — к нам, направление поля — направо, направление ЭДС — вверх.

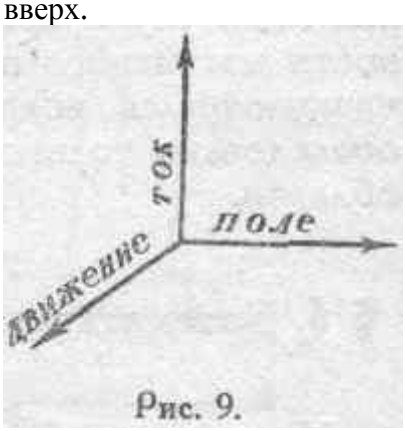


Рис. 9.

Во втором случае, применяя это правило, будем иметь в виду, что оно говорит о движении проводника *относительно поля.* Следовательно, при том же направлении вращения, относительное перемещение проводника (рассматриваем проводник *AB)* в поле будет направлено от нас (рис. 10).

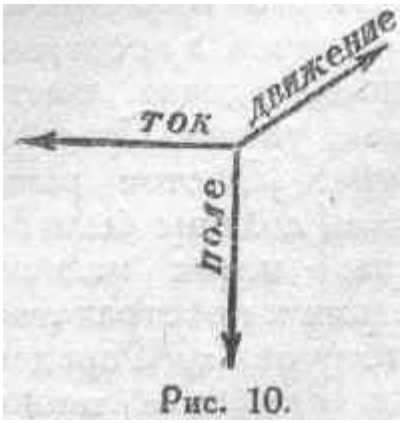


Рис. 10.

Поле в этом случае имеет направление сверху вниз, следовательно, направление ЭДС будет от *B* к *A*, т. е. ЭДС в контуре будет того же направления.

Рассматривая третий опыт Фарадея (вращение магнита в своем собственном магнитном поле), мы убедимся, что и в этом случае величина и направление ЭДС должны быть одинаковы, независимо от того, будем ли мы считать, что элементы магнита пересекают неподвижные магнитные линии, или предположим, что вращающиеся

магнитные линии пересекают внешние части электрического контура.

Работа Прэстона вызвала чрезвычайный *интерес к* многочисленные попытки обосновать ту ил» иную точку зрения при помощи опыта с электромагнитной индукцией. Однако, все попытки этого рода кончились полнейшей неудачей, и в настоящее время эти опыты оставлены, как оставлены попытки построить perpetuum mobile или решить задачу *о* квадратуре круга, ибо несомненно, что как бы мы ни ставили опыт, необходимость иметь замкнутый контур тока приведет неизбежно к возможности объяснения результатов опыта и с той и с другой точки зрения. Никаким опытом из области электромагнитной индукции нельзя доказать справедливость той или иной точки зрения, и поэтому положение Фарадея о неподвижности магнитного потока, связанного с цилиндрическим магнитом, вращающимся вокруг своей оси, может быть экспериментально обследовано только при помощи каких-либо явлений, из другой области.

[1]) Подробный анализ всего вопроса в целом помещен в статье Л. Б. Слепяна — Проблема униполярной индукции. Известия Петроградского Политехнического Института, отдел техники, естествознания и математики, 1914, том XXII, стр. 55.

[2]) См. гл. III, § 46. Непрерывность электрического тока.

§ 6. Математическая формулировка принципа непрерывности магнитного потока.

Итак, мы видели, что обоснование принципа замкнутости магнитного потока, предложенное Фарадеем, вызвало целый ряд сомнений, которые до сих пор не могли быть разрешены путем непосредственных экспериментов. Надо было подойти к этому вопросу как-то иначе. Максвелл первый дал математическое обоснование принципа непрерывности магнитного потока. Сущность рассуждений Максвелла сводится к следующему. Возьмем именно тот случай, когда магнитное поле, существующее внутри тела, недоступно наблюдению, для чего рассмотрим постоянный магнит (рис. 11).

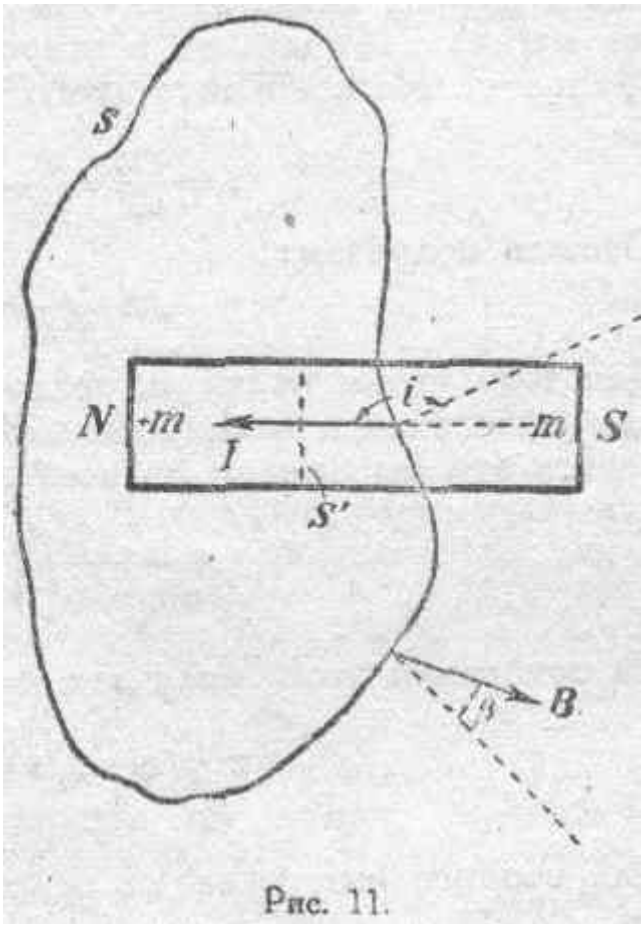


Рис. 11.

Магнитные массы, явно участвующие в процессе создания магнитного поля постоянным магнитом, сосредоточена на полюсах N и S. Обозначим эти магнитные массы через $+m$ и $-m$. Представим себе замкнутую поверхность S, охватывающую один из полюсов, например северный (сечение этой поверхности, изображено на рис. 11). Рассмотрим для данной замкнутой поверхности величину

$$\Phi = \int_S B \cos\beta \, ds,$$

52

где β— угол между направлением вектора магнитной индукции и внешнею нормалью к элементу поверхности *ds*, и, следовательно, Bcosβ— нормальная составляющая магнитной индукции. Выражение ®то представляет собою полный магнитный поток, пронизывающий данную поверхность. Попытаемся рассчитать этот поток. Вернёмся к известному уже нам соотношению (1):

$$B = \mu_0 H + \frac{1}{\pi} I.$$

Все три члена, входящие в него, суть векторы, т. е. величины, имеющие некоторое направление. В случае однородной, изотропной среды они совпадают по направлению, и мы имеем право говорить об алгебраической сумме их. Но в более сложной обстановке *B*, *H* и *I* могут и не совпадать по направлению, и тогда суммирование их должно производиться по правилам сложения векторов, т. е. геометрически, что будем отмечать, ставя черту над соответствующими величинами. Итак, в общем случае можем написать.

$$B = 4\pi\bar{I} + \mu_0\bar{H}.$$

Если $\bar{B}$ есть геометрическая сумма $4\pi\bar{I}$ и $\mu_0\bar{H}$, то проекция B на какую угодно ось будет равна алгебраической сумме проекции $4\pi\bar{I}$ и $\mu_0\bar{H}$ на ту же ось. Возьмем за ось проекций направление нормали к элементу поверхности. Тогда на основании вышесказанного имеем:

$$B\cos\beta = 4\pi I\cos i + \mu_0 H\cos\gamma,$$

где B, I и H суть абсолютные величины (тензоры) векторов $\bar{B}, \bar{I}$ и $\bar{H}$

в некоторой точке поверхности s, а i и γ— углы, образуемые направлениями $\bar{I}$ и $\bar{H}$ с направлением нормали. Таким образом, интеграл

$$\int B\cos\beta\, ds$$

можно разбить на сумму двух интегралов:

$$\Phi = \int_s B\cos\beta\, ds = 4\pi\int_s I\cos i\, ds + \mu_0\int_s H\cos\gamma\, ds.$$

Чтобы определить величину первого интеграла

$$(4\pi\int_s I\cos i\, ds),$$

представим себе, что данный магнит расчленен на бесконечное число нитеобразных магнитов, причем эти нити ориентированы так, что они везде касательны к вектору напряженности намагничения $(\bar{I})$, характеризующему магнитное состояние вещества. Таким обра-

зом получим ряд бесконечно тонких магнитов длиною l с магнитными массами dm на концах. Произведение $l \cdot dm$ даст магнитный момент, относя который к единице объема, получим напряженность намагничения.

Если ds' есть поперечное сечение нитеобразного магнита, перпендикулярное его длине, то объем его будет $l \cdot ds'$. Тогда напряженность намагничения будет

$$I = \frac{l\,dm}{l\,ds'} = \frac{dm}{ds'}.$$

Заменим нормальное сечение элементарного магнита ds' через элемент рассматриваемой замкнутой поверхности s. Очевидно, $ds' = -ds \cdot \cos i$ (знак минус берем потому, что 1 внутри магнита в данном случае, когда замкнутая поверхность охватывает северный полюс магнита, направлена в сторону внутренней нормали к нашей поверхности). На основании этого можем написать:

$$I = \frac{dm}{ds'} = -\frac{1}{\cos i}\cdot\frac{dm}{ds}.$$

Отсюда получаем:

$$dm = -I\cos i\, ds.$$

Для того чтобы найти m, полную величину магнитной массы, находящейся внутри замкнутой поверхности s, необходимо проинтегрировать это выражение по всей замкнутой поверхности, так что:

$$m = -\int_s I \cos i \, ds.$$

На основания этого получаем для величины первого интеграле:

$$4\pi \int_s I \cos i \, ds = -4\pi m.$$

Для второго интеграла на основании теоремы Гаусса (см. § 2) имеем:

$$\int_s H \cos \gamma \, ds = \frac{1}{\mu_0} \cdot 4\pi m.$$

В результате, интересующий нас магнитный поток, пронизывающий рассматриваемую поверхность, будет:

$$\Phi_s = -4\pi m + 4\pi m = 0,$$

или

$$\int_s B \cos \beta \, ds = 0,$$

что и является математической формулировкой принципа непрерывности магнитного потока.

54

Таким образом, *полный магнитный поток, проходящий через любую замкнутую поверхность в направлении внешней нормали, равен нулю.*

Рассмотрим, каков физический смысл полученного математического соотношения. Во всех элементах замкнутой поверхности, лежащих вне магнита, магнитное поле доступно нашему наблюдению, а мы непосредственным опытом можем убедиться в том, что в рассматриваемом случае магнитная индукция вне магнита всегда имеет положительную составляющую в направлении внешней нормали поверхности s. Следовательно, для того, чтобы полученное равенство имело физический смысл, мы должны мыслить магнитный поток внутри магнита направленным в сторону внутренней нормали той же замкнутой поверхности s. Обозначим через Φ_{s0} поток, пронизывающий часть поверхности *s*, лежащую вне магнита, а через Φ_{s1} — поток, пронизывающий поверхность внутри магнита. Общий поток Φ_s, выразится их суммой:

$$\Phi_s = \Phi_{s_0} + \Phi_{s_1}.$$

На основании (5) имеем:

$$\Phi_{s_0} + \Phi_{s_1} = 0,$$

$$\Phi_{s_0} = -\Phi_{s_1}.$$

Знак минус говорит нам о различной ориентировке этих двух составляющих потока относительно нормали к поверхности. Составляющие эти равны по абсолютной величине.

Итак, мы получили математическое обоснование вывода, сделанного Фарадеем в результате ряда его опытов:

Магнитный поток в *целом и каждая составляющая его магнитная линия в частности всегда и везде представляют собою замкнутые контуры, не имеющие ни начала ни конца. Магнитные линии никоим способом не могут быть разрезаны или разорваны и обнаружение концов их ни в каких процессах, в магнитном поле происходящих, невозможно.*

[3]) Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II. § 402.

§ 7. Формулировка закона электромагнитной индукции.

Фарадей, открывший в 1831 году явления электромагнитной индукции, в XXVIII серии своих „Опытных Исследований по Электричеству" в § 3115 устанавливает следующее основное положение: „... количество электричества, протекшее по цепи (индуктированного) тока, прямо пропорционально числу перерезанных (этой цепью) магнитных линий.

55

Еще в I серии своих „Исследований" Фарадей в § 213 устанавливает зависимость силы индуктированного тока от сопротивления проводника:

„Эти результаты показывают, что токи, производимые в телах при помощи магнито-электрической индукции, пропорциональны их проводимости. Что они в *точности* пропорциональны проводимости и всецело зависят от нее, доказывается, я полагаю..." (далее следует ссылка на ряд опытов с различными проводящими материалами).

Таким образом, мы можем в следующем виде представить *основной закон электромагнитной индукции:*

q=-N/r. (6)

Здесь *q* — количество электричества, протекшее в течение некоторого промежутка времени через любое поперечное сечение контура, проводящего индуктированный ток, *N*—число магнитных линий, перерезанных контуром в это время, и r—электрическое сопротивление контура. Знак минус (-) мы вводим в соответствии с данными непосредственного опыта, в целях соблюдения правила, связывающего положительное направление тока в контуре с положительным направлением магнитного потока, пронизывающего контур (правило штопора). При этом числу *N* будем приписывать положительные значения в случае, когда процесс перерезывания магнитных линий влечет за собою увеличение магнитного потока, сцепляющегося с контуром проводника, и отрицательные значения в противном случае.

Пользуясь соотношением (6), легко можно найти выражение для индуктированной ЭДС. Действительно, беря производные от обеих частей равенства (6) по времени, имеем:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{r}\cdot\frac{dN}{dt}.$$

Так как;

$$\frac{dq}{dt} = i,$$

где i—сила тока, то получаем:

ri=dN/dt.

Но *ri* представляет собою не что .иное, как ЭДС, расходуемую в данном случае на преодоление сопротивления цепи, именно:

ri=e.

На основании этого окончательно можем написать:

e=-dN/dt, (7)

56

т. е. *электродвижущая сила, индуктируемая в некотором контуре, не зависит от вещества, формы и размеров проводника, из которого контур состоит. Эта ЭДС зависит исключительно от скорости перерезывания магнитных линий контуром.*

Так как настоящая формулировка закона электромагнитной индукции является лишь простой перефразировкой основных положений, установленных Фарадеем, и в полной мере соответствует его представлению о пересечении магнитных линий проводником, как о первопричине индукции тока, в дальнейшем мы будем соотношение

E=-dN/dt

называть фарадеевской формулировкой закона электромагнитной индукции.

Вскоре после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции Ф. Нейман сделал попытку обосновать математическую теорию этого явления, исходя из закона Ленца. Вслед за тем Гельмгольц и В. Томсон (Кельвин) показали, что электромагнитная индукция может быть рассматриваема как следствие закона сохранения энергии. Во всех этих работах авторы пришли к выражению индуктированной электродвижущей силы в виде производной повремени от некоторой величины, физический смысл которой не был, однако, достаточно ясно вскрыт. Максвелл, основываясь на опытах Фарадея и *принимая во внимание установленный Фарадеем же принцип непрерывности магнитного потока,* показал, что здесь речь идет о магнитном потоке, охватываемом данным контуром (сцепляющимся с данным контуром). Таким образом, предложенная Максвеллом формулировка закона электромагнитной индукции гласит:

e=-iФ/dt, (8)

где e — индуктированная в данном контуре ЭДС, а *Ф* — полный магнитный поток, сцепляющийся с контуром.

С математической точки зрения преобразование первой формулировки (фарадеевской) во вторую (максвелловскую) представляет собою не что иное, как преобразование линейного интеграла, распространенного по замкнутому контуру, в поверхностный интеграл, распространенный по площади, ограниченной контуром. При этом следует иметь в виду, что такое преобразование одного интеграла в другой имеет смысл и возможно *только при условии,* что рассматриваемый контур не претерпевает никаких изменений,

нарушающих его непрерывность, как строго определенного контура. Только в этом случае обязательно всегда будет:

dN=dФ,

и мы можем написать:

e=-dN/dt=-dФ/dt.

Если же условие о непрерывности и неизменности контура электрической цепи не выполняется, то соотношение

- *dN/dt=-dФ/dt* может и не иметь места.

[1]) Faraday, Exp. Res., Vol. I, § 213: „These results tend to prove that the currents produced by magneto-electric induction in bodies are proportional to their conducting power. That they are exactly proportional to and altogether dependent upon the conducting power, is, I think, proved by. .."

[1]) Faraday, Experimental Researches in Electricity, Vol. III, § 3115. .... the quantity of electricity, thrown into a current is directly as the amount of curves intersected".

§ 8. Вопрос об условиях тождественности фарадеевской и максвелловской формулировок закона электромагнитной индукции.

Указанный вопрос имеет весьма важное значение для правильного понимания того, что происходит во всех электромагнитных механизмах. Недостаточно отчетливое понимание существа дела нередко приводило к серьезным недоразумениям. Бывали примеры того, что весьма опытные электрики,

работавшие над расчетом электрических машин, ошибались, утверждая, что формулировки, данные Фарадеем и Максвеллом, выражают собой два различных физических явления.

Спор, между прочим, однажды возник по поводу процесса индуктирования ЭДС в зубчатых арматурах электрических машин. Якори электрических машин в первоначальных конструкциях представляли собой, как известно, гладкие железные цилиндры, на поверхности которых по образующим укладывались составлявшие обмотку провода (схематический рис. 12).

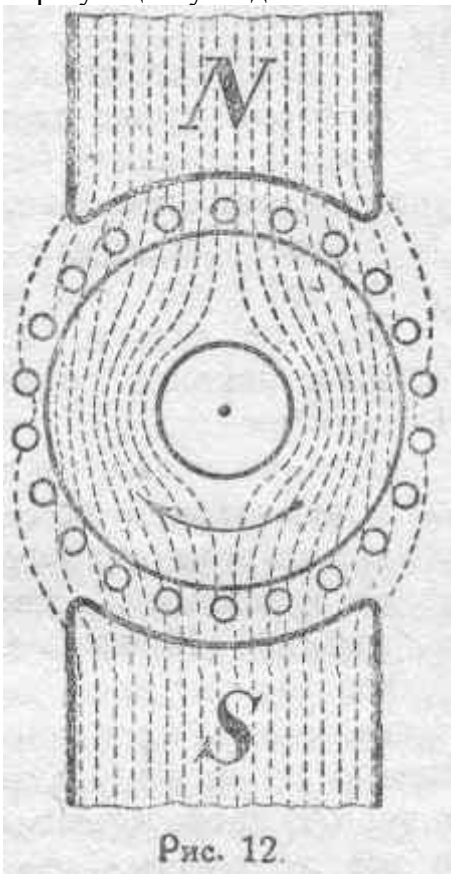


Рис. 12.

При вращении якоря в магнитном поле эти проводники резали магнитные линии, причем величина индуктированной ЭДС обычно определялась при расчете числом пересечений в 1 секунду, т. е. применялась формула (7):

$e=-dN/dt.$

Однако, механические усилия, приложенные к проводам обмотки, особенно в случаях коротких замыканий и т. п. ненормальных режимов, оказывались при таком расположении обмотки настолько значительными, что вопрос о креплении ее на барабане якоря представлял большие практические трудности. С развитием динамо-строения техника выработала новый тип якорей, так называемые зубчатые арматуры, в которых проводники обмотки укладываются во впадинах барабана (рис. 13).

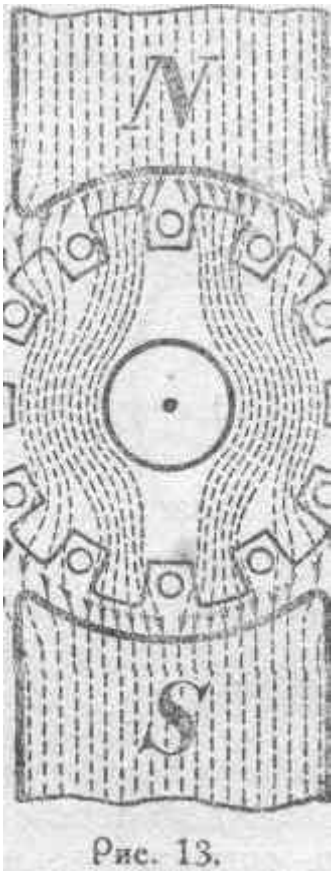


Рис. 13.

При такой конструкции якоря магнитный поток, входя в якорь, не распределяется равномерно по его окружности, а вследствие большей магнитной проводимости железа направляется главным образом через зубцы. Проводники же,
58

утопленные во впадинах, оказываются при этом в магнитном поле, в сотни раз более слабом, чем в случае гладкой арматуры. Казалось бы, что движение проводников, находящихся в очень слабом магнитном поле, должно сопровождаться незначительным числом пересечений этих проводников магнитными линиями, а следовательно, и незначительной величиной индуктированной ЭДС. Опыт, однако, показывает, что, при прочих равных условиях, машина с зубчатой арматурой дает в точности такую же ЭДС, что и машина с гладким якорем. Это именно обстоятельство в свое время и вызвало большие споры и разногласия в среде электротехников. Для объяснения создавшегося противоречия некоторыми было даже выдвинуто следующее положение: в случае зубчатой арматуры ЭДС индуктируется не в силу пересечения проводниками магнитных линий (что якобы в этом случае почти не имеет места), а вследствие изменений потока, пронизывающего витки якоря, и что величину ЭДС в этом случае надо рассчитывать *по* формуле (8):

$e=-d\Phi/dt.$

Одним словом, делались указания, будто бы две, приведенные нами выше формулировки закона электромагнитной индукции (7) и (8) выражают различные физические явления. Между тем подобное утверждение в корне неверно. Сущность процесса генерирования ЭДС в обоих случаях совершенно одинакова. Ниже, в § 14, мы подробнее разберем физический смысл экранирования проводников от магнитного поля (ослабления магнитного поля в непосредственной близости к проводнику — применением железной брони, роль которой
59

в рассматриваемом случае играют зубцы якоря). Пока же рассмотрим вопрос с чисто геометрической точки зрения и поясним то» что было сказано в § 7, а именно, что *всякое* изменение магнитного потока, охватываемого строго определенным контуром, может произойти *только* за счет пересечения контуром магнитных линий, причем число пересеченных линяй в точности равно изменению потока (напомним, что поток измеряется числом магнитных линий), т. е. всегда в случае строго определенного контура:

$\Delta\Phi = \Delta N$

Это утверждение непосредственно вытекает из принципа замкнутости магнитного потока. В самом деле, замкнутый неизменяемый электрический контур (а всякий контур электрического тока является замкнутым) и каждая связанная с ним магнитная линия, которая также всегда замкнута по своей природе, представляют собой как бы два связанных между собой звена цепи (см. рис. 14).

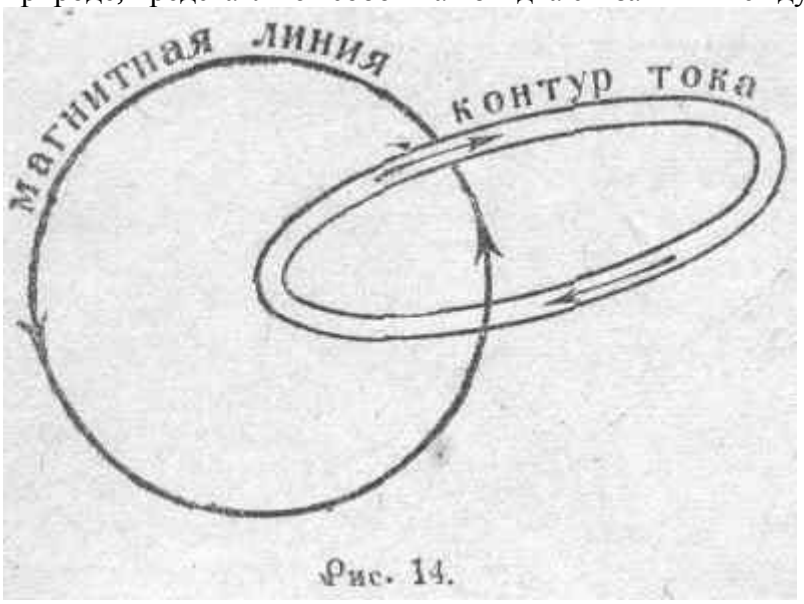


Рис. 14.

Мы не можем, не нарушая законов трехмерного пространства, расцепить эти два звена, не приведя их в интимное соприкосновение друг с другом, т.-е. не прибегая к „перерезыванию". Иными словами, мы не можем изменить величину магнитного потока, пронизывающего неизменяемый контур, ни на одну линию без того, чтобы эта линия не пересекала контура. В настоящее время это нам должно быть совершенно ясно. Но все же до сих пор время от времени появляются работы, основанные на непонимании универсальности и непреложности принципа замкнутости магнитного потока и поэтому естественно приводящие авторов к парадоксальным результатам. Между тем осознание этого принципа совершенно необходимо при рассмотрении процессов, происходящих в электромагнитных механизмах.

Итак, обе формулировки закона электромагнитной индукции (7) и (8) в случае строго определенного и неизменного контура тока совершенно тождественны и выражают собой один и тот же физический процесс. Существование двух формулировок объясняется тем, что на практике в различных случаях мы видим более отчетливо то одну, то другую сторону этого процесса. В приведенных выше примерах, в случае гладкой арматуры, мы имеем явное пересечение проводником магнитных линий, а в случае зубчатого якоря явление пересечения замаскировано, и на первый план как будто бы выступает эквивалентное ему явление изменения потока, охватываемого контуром.

60

§ 9. Случай изменяемого контура.

В качестве еще одного примера приведем опыт, проделанный автором настоящей книги в 1901 году с целью уяснения основного закона электромагнитной индукции.

Было взято железное кольцо *A* с равномерно распределенной на нем обмоткой из некоторого числа витков изолированной проволоки (рис. 15), через которую пропускался электрический ток от батареи.

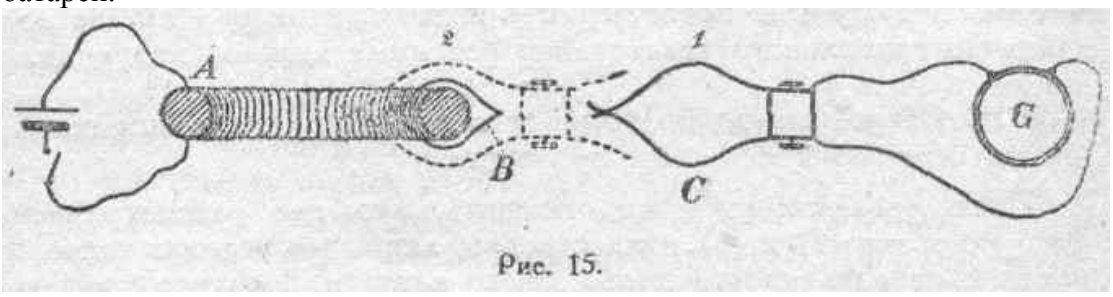


Рис. 15.

Так как в данном случае мы имеем симметричный кольцевой соленоид, то все магнитные линии расположены, как известно, внутри него. На кольцо был надет медный челнок *B* указанной на чертеже формы, электрически не связанный с основной цепью соленоида. Второй контур составлялся из баллистического гальванометра с двумя проводниками, заканчивающимися двумя пружинящими контактными пластинами в виде щипцов *C*. В первом положении эти контакты замыкали контур гальванометра на себя. В этом положении с контуром гальванометра не связан никакой магнитный поток. В дальнейшем контакты надвигались на челнок, и,

таким образом, получалась возможность, не разрывая электрически цепи гальванометра, простым продвижением челнока между контактными пластинами ввести в контур цепи магнитный поток соленоида (положение 2). Опыт должен был ответить на вопрос, возникнет ли, индуктированная ЭДС при таком введении магнитного потока в контур гальванометра. Казалось бы, что изменение магнитного потока, связанного с контуром ($\Delta\Phi \neq 0$), должно вызвать возникновение ЭДС. Однако, при осуществлении опыта гальванометр не дает никакого отклонения. Не трудно убедиться, что его и :не должно быть. В самом деле, постановка опыта такова, что при :внесении соленоида в контур гальванометра, *пересечение магнитных линий проводником не имеет места.* Что же касается кажущегося изменения магнитного потока, связанного с контуром, то необходимо :помнить, что Максвелл в своей формулировке закона электромагнитной индукции имел в виду *неизменяемый* контур, ибо только в этом случае, как указано выше, возможен математический переход

-от формулы (7): $e=-dN/dt$ к формуле (8): $e=-d\Phi/dt$

В обстановке произведенного опыта контур гальванометра не является неизменным, в чем не трудно убедиться, рассмотрев схему

61

рис. 16, по существу совершенно аналогичную схеме поставленного опыта. Ясно, что поочередное замыкание и размыкание ключей 1 и 2 вполне соответствует выведению соленоида из контура гальванометра или введению его в этот контур при помощи челнока.

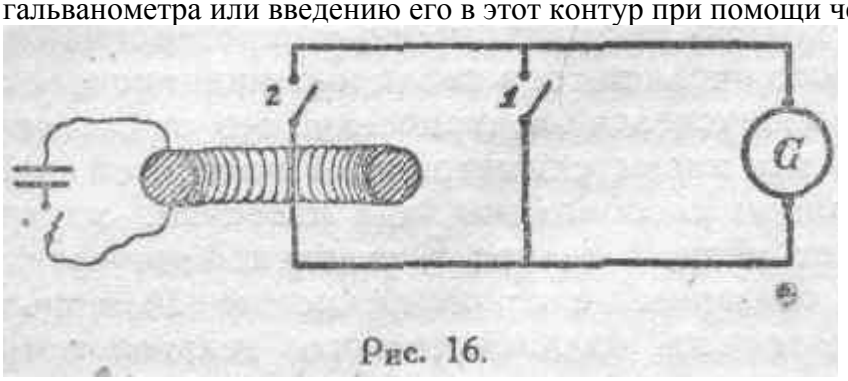


Рис. 16.

В то же время изменение контура во втором примере выступаем с совершенной очевидностью. Подобная подмена контура нередко встречается при постановках различных опытов, имеющих

целью то или иное использование явления электромагнитной индукции и приводящих к недоразумениям в случае недостаточно правильного трактования основных законов индукции.

§ 10. Общий вывод по вопросу о законе электромагнитной индукции.

Итак, чрезвычайно важно помнить, что две рассматриваемые формулировки (7) и (8) тождественны лишь при условии непрерывности и определенности проводящего контура. В случае каких-либо переключений в этом контуре тождество формулировок (7) и (8) может и не иметь места. При этом фарадеевская формулировка (7):

$e=-dN/dt$ является как бы более универсальной. Она приложима независимо от того, есть ли коммутация в рассматриваемой цепи или нет. Во всех сложных случаях электромагнитной индукции тока мы обычно легче разбираемся, обращаясь к первичной формулировке Фарадея. Он мыслил индукцию как результат непосредственного взаимодействия магнитного потока и проводящего контура, т. е. как результат пересечения магнитного потока проводником. Если мы это пересечение имеем — есть и ЭДС индукции. Если пересечения нет — нет и ЭДС, не может быть и индуктированного тока в замкнутом контуре. Сказанное отнюдь не имеет целью умалить значение максвелловской формулировки (8): $e=-d\Phi/dt$. Последняя представляет собою совершенно точное выражение индуктированной ЭДС, приложимое ко всем случаям, когда мы имеем дело с определенным неизменяемым контуром. Весьма часто максвелловская формулировка оказывается при математическом анализе явлений даже более удобной, чем формулировка фарадеевская. Но всегда, во всех электромагнитных устройствах, в которых мы имеем дело с какими-либо изменениями в области расположения магнитного потока, внимательное рассмотрении схемы и анализ физического процесса неминуемо должны приводить нас к картине относительного движения проводника и магнитных линий и так называемого „пересечения" их проводником. Это — необходимое следствие из принципа замкнутости магнитного потока.

62

§ 11. О преобразованиях магнитного потока.

Во всех без исключения электромагнитных механизмах (динамомашинах, электродвигателях и т. п.) всегда вообще, когда мы имеем дело с преобразованием механической энергии в энергию электрического тока или обратно, а также с перераспределением или изменением запаса энергии, связанной с наличием магнитного потока, — во всех этих случаях мы встречаемся с какими-либо изменениями конфигурации магнитного потока в целом ила в отдельных частях системы. В справедливости этого утверждения мы с несомненностью убеждаемся при тщательном обследовании электромагнитных процессов. Всякое изменение конфигурации магнитного потока мы будем называть *преобразованием магнитного потока.*

Из всего комплекса фарадеевских представлений о магнитных. линиях особо существенное значение имеет представление об их непрерывности. Как было выше разъяснено (§ § 4, 5 и 6), магнитные линии всегда образуют обязательно замкнутые контуры. Каждый элемент магнитного потока, т.-е. каждую магнитную линию, мы должны мыслить, как замкнутый контур, ни в коем случае не могущий быть прерванным. Эту замкнутую магнитную линию мы должны сверх того мыслить, как весьма эластичную нить, могущую претерпевать какие угодно деформации и изменения, но только не разрыв. Концов магнитной линии мы не можем себе представить, и, насколько нам известно, в природе их не существует.

Итак, строго придерживаясь воззрений Фарадея, мы должны принять, что, какие бы превращения магнитная линия ни претерпевала, она всегда непрерывна и контур ее неизменно сохраняется замкнутым.

Отметим между прочим, что магнитные линии в отношении непрерывности ведут себя подобно замкнутым вихревым нитям. Гельмгольца, представляющим собой контуры, которые никаким способом не могут быть, разорваны. Как известно, вихревою нитью в какой-либо

жидкости называется совокупность частиц жидкости, заключающаяся в некотором объеме трубчатой формы с чрезвычайно малым сечением и вращающаяся вокруг оси этого трубчатого элемента объема. Гельмгольц подверг математическому обследованию свойства вихревых нитей и показал, что в идеальной жидкости, т.-е. в жидкости без внутреннего трения, вихревая нить может существовать только или в виде замкнутого кольца, или же заканчиваясь на границах данной идеальной жидкости. В безграничной идеальной жидкости возможны только замкнутые вихревые кольца, которые, следовательно, никоим образом не могут быть разрезаны. Вместе с тем, по Гельмгольцу, такие вихревые кольца, раз возникшие в идеальной жидкости, абсолютно неуничтожаемы. Вдоль оси всякой вихревой нити существует стремление к сокращению, или тяжение, а в поперечном направлении — стремление к расширению, или давление на окружающие участки среды. Все это в значительной степени соответствует известным нам свойствам

63

магнитных линий. Сверх того, серьезным доводом в пользу признания за этим соответствием чего-то большего, чем простая аналогия, служит, по мнению Максвелла, открытое Фарадеем явление магнитного вращения плоскости поляризации, свидетельствующее о существовании в магнитном поле какого-то вращения вокруг осей, совпадающих с силовыми линиями этого поля, В виду изложенного Максвелл в ряде своих работ, посвященных вопросу о природе магнитного поля и явлений, в нем наблюдаемых, рассматривал магнитные линии, как вихревые нити в некоторой идеальной среде. Представление о ней мы можем связать с идеей „мирового эфира". Хотя в последнее время в науке и проявлялась тенденция отрешиться от понятия „мировой эфир", тем не менее идея эта продолжает оставаться весьма полезной и даже совершенно необходимой в целом ряде случаев и, в частности, когда мы строим предположения о вероятном механизме электромагнитных явлений.

При преобразованиях магнитного потока в целом ряде случаев мы имеем дело с процессом такого *непрерывного* преобразования отдельных магнитных линий, во время которого путем слияния некоторых частей этих линий может происходить либо деление одной замкнутой магнитной линии на два обособленных замкнутых же магнитных звена, либо, обратно, соединение двух обособленных магнитных звеньев в один общий замкнутый контур. Подобного рода преобразования магнитных линий были рассмотрены в свое время Фарадеем, и он описывает их в III томе „Опытных Исследований по Электричеству". В следующих параграфах, данных здесь в переводе, довольно определенно выражено мнение Фарадея по этому поводу, явившееся результатом длительного и тщательного изучения физических свойств магнитного поля.

3226. „Силовые линии различных магнитов, в случае благоприятного расположения их друг относительно друга, соединяются (сращиваются)".

С 3227. „При этом соединении не имеет места какое бы то ни было возрастание активности линий; поток между двумя сближаемыми полюсами обладает тою же активностью (в отношении индуктивных действий), как и совокупность линий, исходящих из полюса постоянного магнита, когда мы имеем дело лишь с ним одним (3217)...".

3230. „Линия магнитной силы, рассматриваемая как замкнутая цепь (3117), проходит в своем протяжении через оба магнита, когда они располагаются так, что действуют друг на друга в благоприятном смысле, т.-е. когда их линии сближаются и соединяются. Соединение это не есть прибавление одной силовой линии к другой в *отношении активности*, но оно представляет собою их объединение в общую цепь".

3294. Сближение магнита с магнитом и все, что этим обусловливается (3218), происходит в полной гармонии, насколько я мог обнаружить, с идеей о физической линии магнитной силы...". Итак, при анализе ряда конкретных случаев таких преобразований мы будем руководствоваться взглядами Фарадея на характер этих процессов. Основным моментом в непрерывном пре-

образовании одной замкнутой магнитной линии в два обособленных магнитных звена или в обратном преобразовании двух магнитных звеньев в один общий контур является момент контакта двух участков магнитных линий противоположного направления. В месте контакта происходит как бы нейтрализация двух противоположных магнитных состояний среды, сопровождающаяся исчезновением магнитного состояния в точке контакта и преобразованием первоначальной конфигурации магнитных линий в новую. Момент контакта соответствует неустойчивому состоянию системы, подобно тому как в случае слияния или разделения двух капель жидкости мы встречаемся также с неустойчивым состоянием и именно в момент контакта. От этого неустойчивого состояния система стремится перейти к устойчивому в ту или другую сторону от состояния контакта, в зависимости от общего направления процесса преобразования.

Проследим теперь отдельные стадии интересующего нас процесса преобразования магнитных линий. Рассмотрим два постоянных подковообразных магнита (рис. 17), расположенных сначала вдали один от другого, т. е. допустим при этом, что расстояние между линиями A_1B_1 и A_2B_2 очень велико.

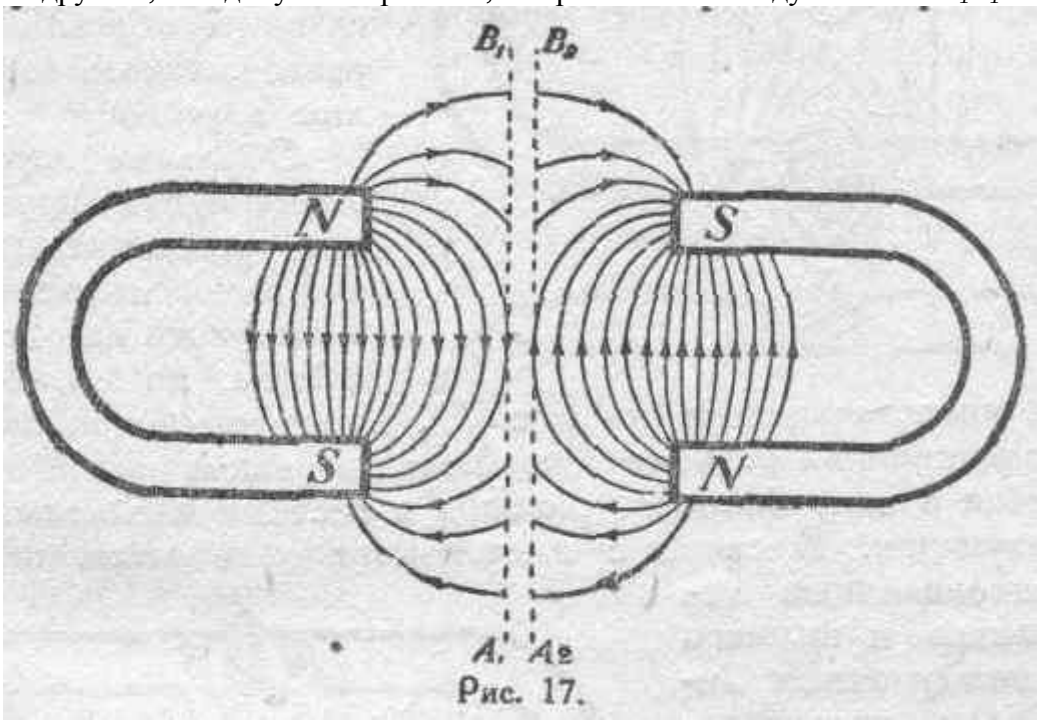


Рис. 17.

В таком случае мы имеем два обособленных магнитных потока, каждый из которых связан с соответствующим магнитом. Магнитные линии, исходящие из северного полюса одного из магнитов, направляются к южному полюсу того же магнита. Расположение полюсов на рис. 17 намеренно взято таким, что в одном магните между полюсами магнитные линии идут сверху вниз, а в другом — снизу вверх. Будем теперь сближать магниты. Противоположно направленные магнитные линии двух потоков в процессе сближения будут, по Фарадею, находиться в условиях „благоприятных" для слияния и в своем стремлении слиться они будут взаимно притягиваться, приходя попарно в контакт одна с другой. В месте контакта происходит слияние двух магнитных линий, образующих до этого каждая свой особый замкнутый контур, в один общий контур, проходящий через

оба магнита. На рис. 18 схематически представлена картина расположения магнитных линий в случае, когда магниты несколько сближены.

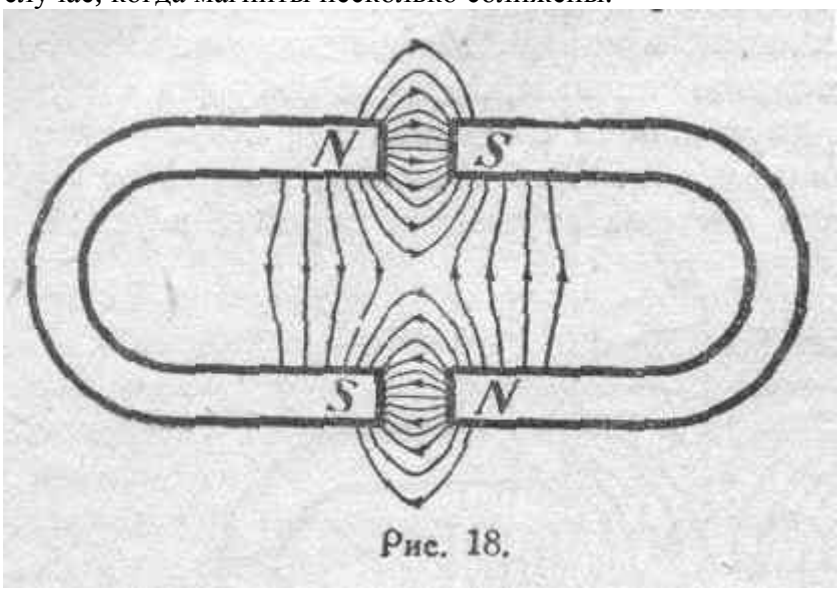


Рис. 18.

Часть магнитных линий двух обособленных потоков уже претерпела преобразование и слилась, образовав общие контуры, часть же сохранила еще свою самостоятельность и попрежнему соединяет полюсы одного и того же магнита. При дальнейшем сближении магнитов мы должны притти *к* пределу такого рода преобразований (рис. 19).

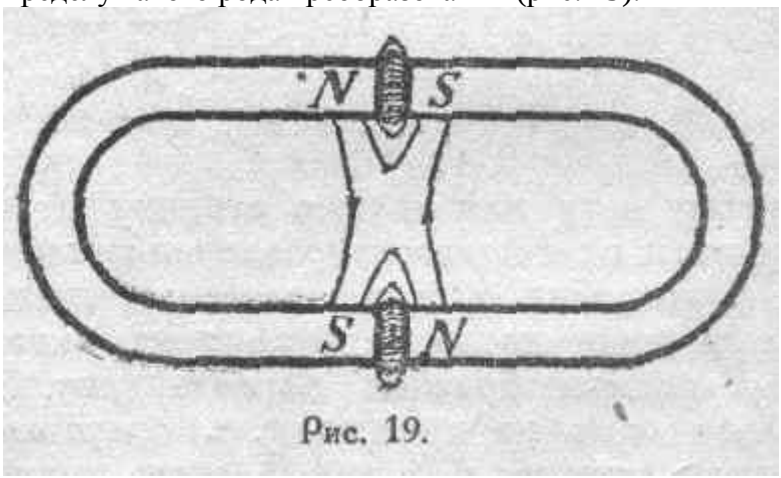


Рис. 19.

Почти все магнитные линии сольются: исходя из северного полюса одного магнита, они направляются главным образом в близ расположенный южный полюс другого.

Обратные преобразования будут происходить при раздвигании магнитов: от расположения, изображенного на рис. 19, мы дойдем до наибольшего удаления, представленного на рис. 17. При этом пучок магнитных линий, соединяющих разноименные полюсы разных магнитов, будет расширяться в силу бокового распора в системе магнитных линий, его образующих. В связи с этим начнут сближаться противоположно направленные линии верхнего и нижнего пучков, между этими линиями будут последовательно происходить контакты и слияния в новые комбинации из отдельных частей замкнутых магнитных линий, образовывавших до того общие для двух магнитов контуры.

В результате мы будем иметь восстановление двух первоначальных обособленных магнитных потоков. Рис. 18 мы можем рассматривать теперь как промежуточную стадию этого обратного преобразования, а рис. 17 иллюстрирует окончательный результат. Итак, контур магнитной линии может претерпевать всякого рода деформирования и преобразования вплоть до отделения новых замкнутых магнитных линий или, обратно, контур данной магнитной линии может сливаться с контуром другой магнитной линии и в результате образовывать единый контур, и все это происходит без каких бы то

ни было нарушений непрерывности магнитных линий, т. е. без их разрывов, без обнажения их концов.

Аналогию этому можно привести и из области электрических цепей. Действительно, всякий замкнутый контур постоянного тока

66

можно *без перерыва тока и даже без всякого изменения тока* преобразовать в два отдельных и электрически совершенно не связанных проводящих контура, если только в основном контуре есть хотя бы две точки, между которыми разность потенциалов равна нулю. Это практически может иметь место, если в основном контуре тока существуют хотя бы два независимых источника электродвижущей силы, действующие в контуре в одну и ту же сторону. Подобрав надлежащим образом сопротивление отдельных частей цепи, всегда можно получить искомые две точки. Коротко соединяя эти две точки между собою, мы ни в малейшей степени не изменим силы тока в какой бы то ни было части рассматриваемой системы. Но при этом мы по существу будем уже иметь два независимых контура, лишь соприкасающиеся в одной общей точке и могущие совершенно разделиться при соответствующем разрезании проводов в этой точке. В то же время электрические токи, протекающие по этим двум контурам, остаются неизменными и ни на момент не прекращающимися. Подобным образом можно осуществить *непрерывное преобразование* некоторого контура тока в два независимых и не связанных друг с другом контура с токами. В случае сверхпроводящего контура такое преобразование может повторяться сколь угодно большое число раз, так как все точки сверхпроводящей цепи, некоторой протекает постоянный электрический ток, всегда имеют один и тот же потенциал. И обратно: путем непрерывного преобразования *без* изменения сил токов можно слить сколь угодно большое число электрических цепей, по которым протекают токи одной и той же силы, в один общий контур.

Повидимому, в рассматриваемых случаях преобразования магнитных линий и электрических токов происходит нечто подобное разделению и слиянию струй в материальной жидкости, где из замкнутого контура основной струи может выделиться новый замкнутый контур самостоятельной замкнутой струи, а также может произойти обратное воссоединение этих струй при полном сохранении непрерывности движения жидкости: всякая частица жидкости, участвующая в движении, может во все время преобразования струй продолжать свое движение, ни на момент не останавливаясь. В качестве иллюстрации к сказанному можно предложить такого рода эксперимент. Представим себе вместо подковообразных магнитов две трубки такой же формы с помещенными внутри них пропеллерами. Вся система располагается в сосуде с водой. Надлежащим образом согласованное вращение двух пропеллеров создает поток воды общий для двух трубок: струи этого потока будут замыкаться между концами обеих сближенных трубок, как показано на рис.20.

67

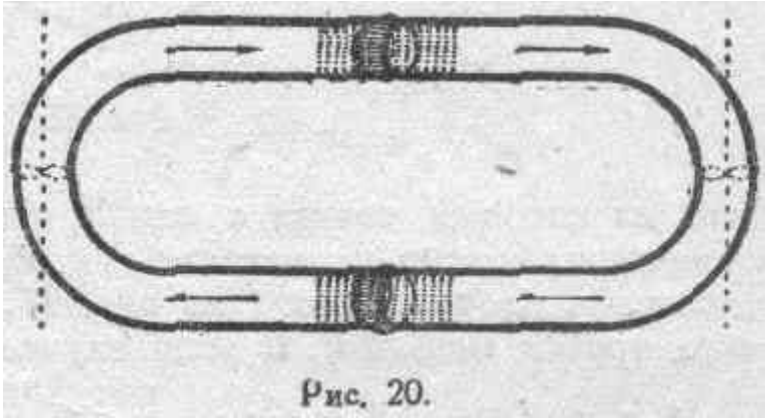


Рис. 20.

Начнем затем удалять подковообразные трубки одну от другой, переходя в конце концов к расположению, представленному схематически на рис. 21. Во все время этого раздвигания, *без какого бы то ни было нарушения непрерывности движения любой частицы жидкости,* мы будем иметь такое преобразование струй, которое приведет нас к двум обособленным замкнутым потокам воды, каждый из которых связан с одной только трубкой. Описываемый эксперимент можно произвести и в обратном порядке, идя от расположения, изображенного на рис. 21, к состоянию полного сближения трубок (рис. 20).

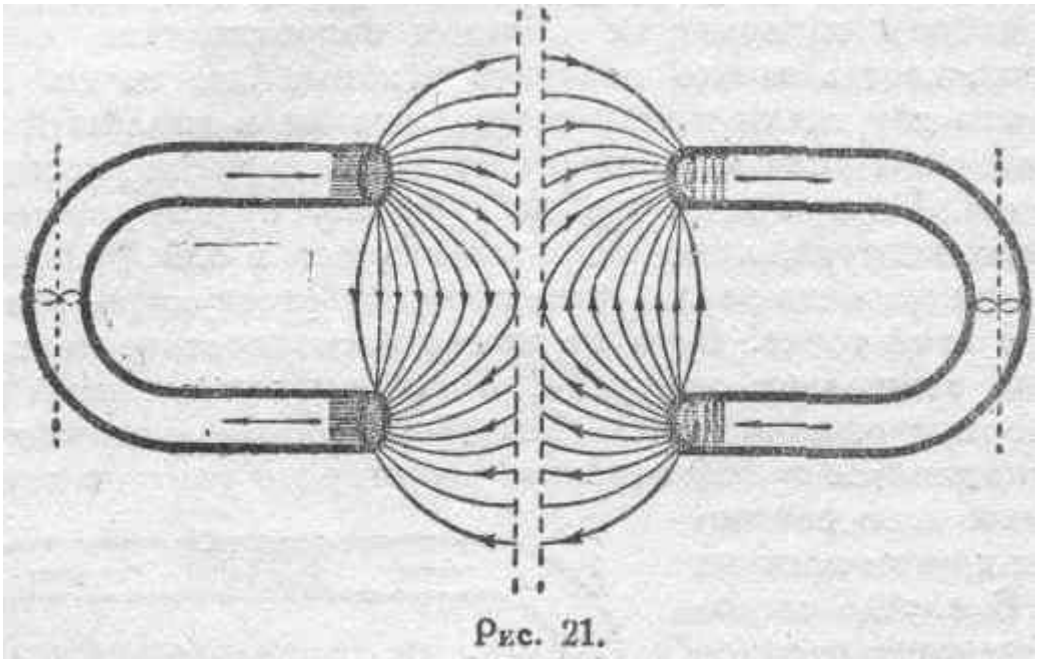


Рис. 21.

В этом случае произойдет обратное преобразование струй: из двух обособленных потоков воды мы получим один общий.

Рассмотрим еще общую схему преобразования магнитных линий, связанных с двумя сближенными витками, по которым текут токи одинакового направления. Как показано на рисунке 22, большая часть магнитных линий является общей для обоих витков.

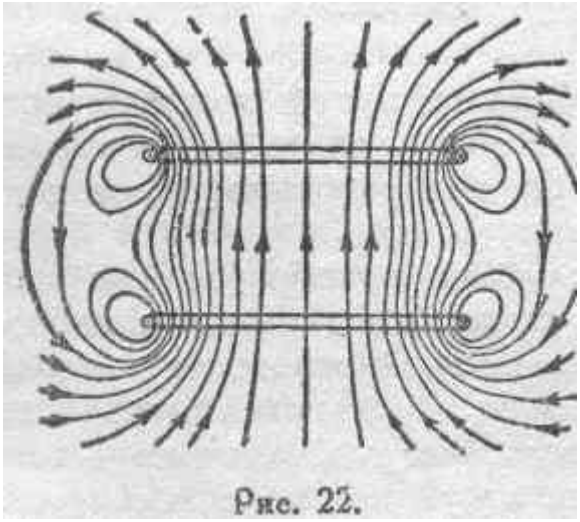


Рис. 22.

Будем раздвигать эти витки. Для большей наглядности сосредоточим внимание на какой-либо общей для обоих витков линии. На рис. 23 вверху схематически представлены следы двух раздвигаемых проводов, разрезанных плоскостью рисунка, и одна охватывающая их магнитная линия.

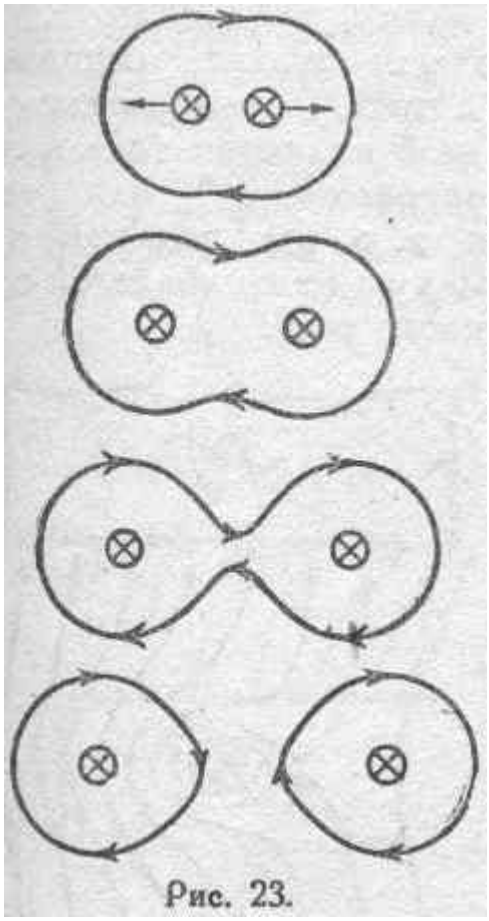


Рис. 23.

Ниже представлено деформирование магнитной линии в несколько продвинувшейся стадии. Противоположно направленные части одной и той же замкнутой магнитной линии в промежутке между проводами стремятся сблизиться. Еще ниже это сближение изображено в стадии, непосредственно предшествующей неустойчивому состоянию контакта и слияния в перехвате, за которым следует разделе-

68

ние исходной магнитной линии на два обособленных магнитных звена, сцепляющихся каждое со своим витком (рис. 23, внизу).

В конце концов, при достаточном раздвижении витков подобному преобразованию последовательно подвергнутся все магнитные линии, общие для обоих витков, и получатся два совершенно, обособленных магнитных потока, каждый из которых сцепляется только с одним витком.

При сближении проводников, несущих электрические токи одинакового направления, происходит обратное явление (рис. 24).

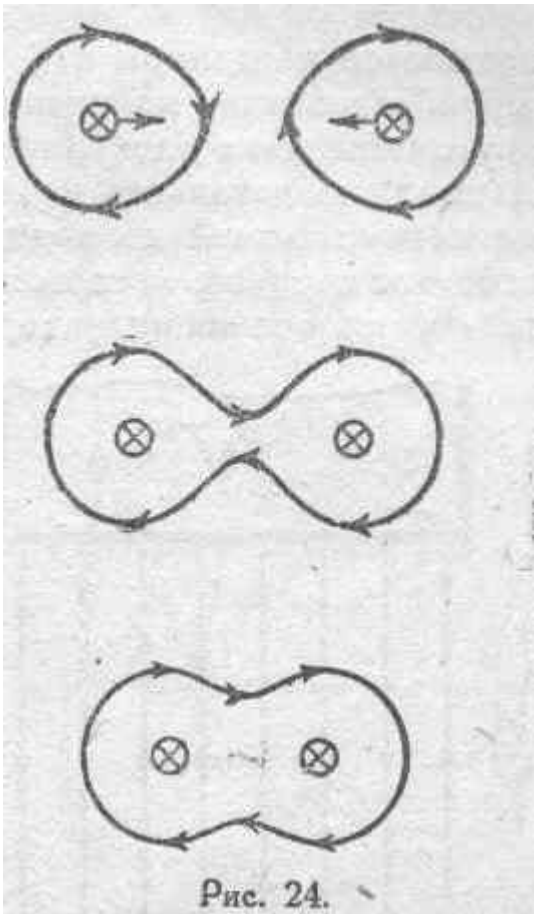


Рис. 24.

А именно, путем слияния двух замкнутых магнитных линий, изображенных вверху, образуется одна, сначала в виде восьмерки, затем она немедленно приобретает более устойчивую форму, бисквитообразную. При этом мы получаем магнитную линию, охватывающую оба проводника. Здесь опять мы не имеем дела с разрывом магнитных линий, а лишь с преобразованием их, основанном на слиянии.

Все рассмотренные выше схемы распределения магнитных линий в различных стадиях их преобразования (рисунки 17 — 24) в общем вполне соответствуют тому, что может быть получено либо путем магнитных спектров, либо путем аналитического решения вопроса о силовых линиях магнитного поля в каждом частном случае. Отметим при этом, что стадия контакта магнитных линий может быть без всяких затруднений обследована только аналитическим методом. Магнитные же спектры в этом случае не могут дать отчетливой картины, ибо как раз в месте контакта магнитная сила

69

в точности равна нулю, а вблизи этого места почти равна нулю, и, следовательно, в этой области отсутствует или почти отсутствует та ориентирующая сила, которая должна надлежащим образом располагать железные опилки.

§ 12. Механизм перерезывания магнитных линий проводником.

Основываясь на данном в § 11 общем анализе основных случаев преобразования магнитного потока, мы обратимся теперь к вопросу о механизме электромагнитной индукции тока и покажем, как надлежит представлять себе „перерезывание", или „пересечечение", магнитных линий проводником, т. е. как надлежит представлять себе тот процесс, который по Фарадею, является основной причиной генерирования индуктированного тока.

Рассмотрим движение проводника поперек внешнего магнитного поля. На рис. 25 схематически представлен магнитный поток, исходящий из северного полюса некоторой магнитной системы и входящий в южный.

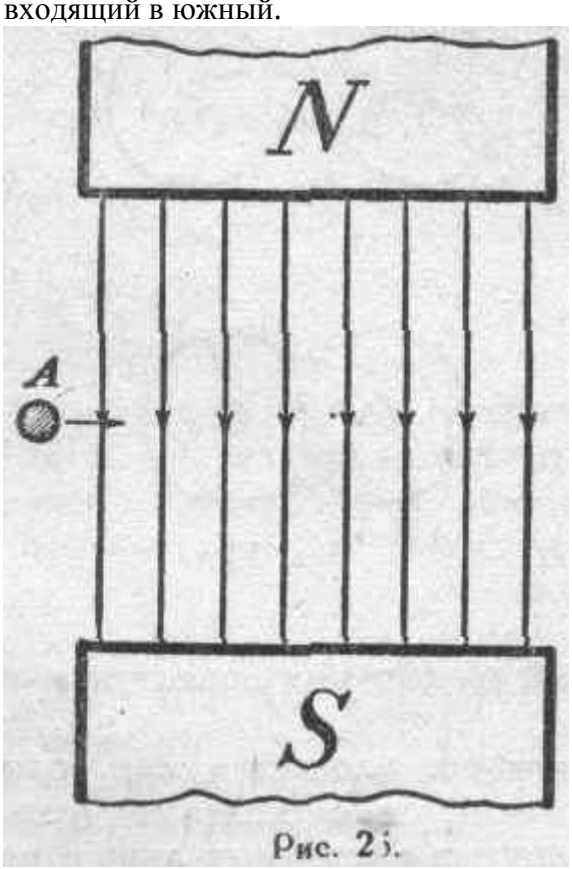


Рис. 25.

Пусть *A* представляет собою сечение прямолинейного проводника, перпендикулярного плоскости рисунка. Допустим, что этот проводник, двигаясь слева направо, как показано стрелкой, должен перерезать все магнитные линии поля. При этом могут быть два случая. Первый случай — проводник разомкнут, т. е. не входит в состав замкнутого проводящего контура. В этом случае, оставляя в стороне начальный момент, мы можем сказать, что в проводнике не будет поддерживаться индуктированный электрический ток, и мы имеем все основания представлять себе, что во время движения проводника поперек магнитного поля магнитное линии, нисколько не деформируясь, проходят

сквозь вещество проводника. Второй случай — проводник замкнут. Создаются условия для длительного прохождения по проводнику индуктированного электрического тока. В случае достаточной силы этого тока проводник может быть окружен непосредственно к нему прилегающими кольцевыми магнитными линиями тока (рис. 26), причем направление этого тока будет в данном случае от нас за плоскость рисунка.

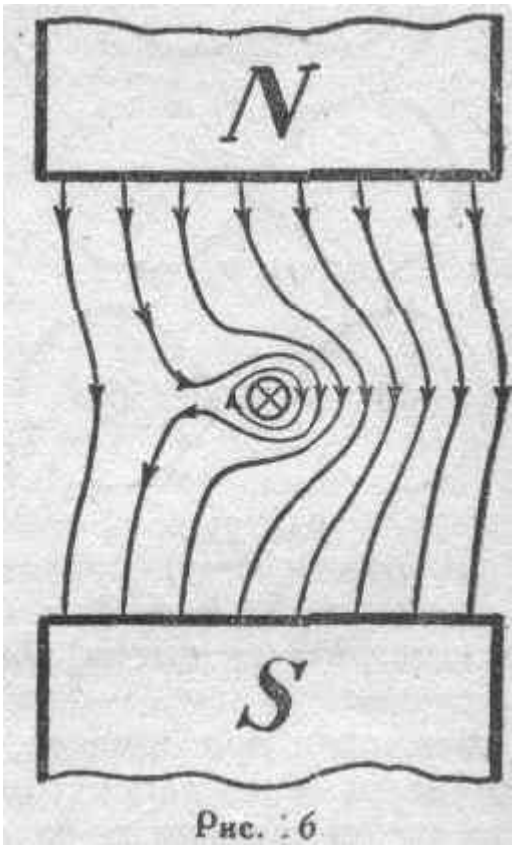


Рис. 26

В силу бокового распора между магнитными линиями, проводник с током оказывается как бы забронированным от проникновения внутрь него магнитных линий внешнего поля. Эти последние должны вследствие этого деформироваться при движении проводника, как показано на рис. 26, 27 и 28.

Последовательность явлений необходимо представлять себе в этом случае так: от схемы, изображенной на рис. 26, мы со „скачком" переходим к схеме рис. 27.

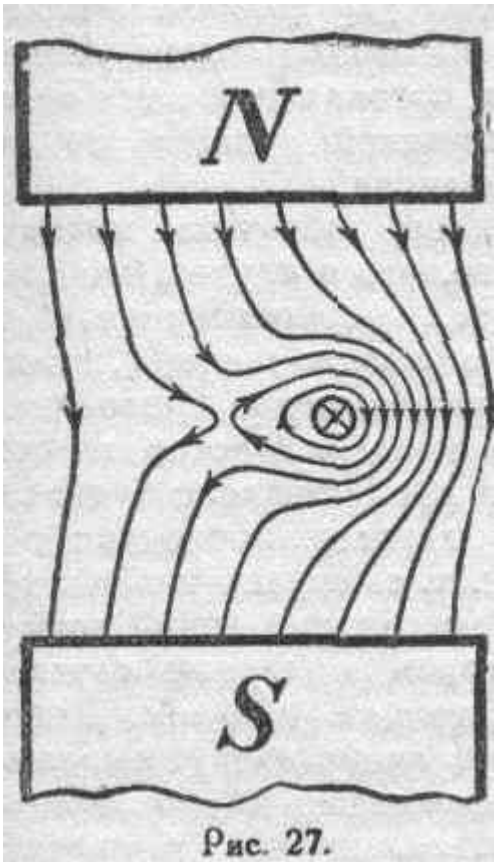


Рис. 27.

Стадия процесса, изображенная на этом рисунке, представляет момент отделения „отпочкования" от второй (слева) магнитной линии одного магнитного звена, которое оказывается нанизанным на проводник подобно другим магнитным линиям тока. Таким образом, вторая магнитная линия, бывшая справа от проводника, оказывается теперь слева. Той же участи последовательного деформирования, отпочкования и перекидывания справа от проводника налево подвергаются по очереди (рис. 28) все „перерезываемые" линии внешнего магнитного поля.
71

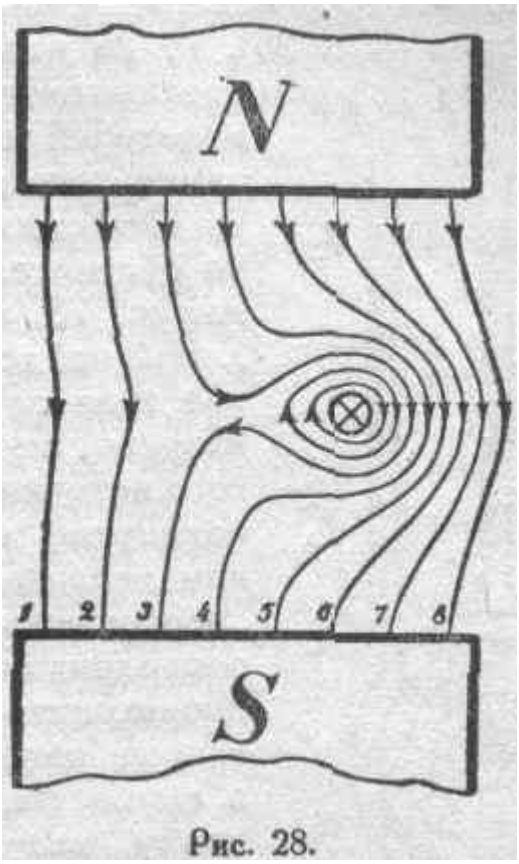


Рис. 28.

Так надлежит представлять себе в общем случае, *в полном соответствии с идеями Фарадея,* процесс „перерезывания" магнитного потока движущимся проводником, по которому идет индуктированный ток. Что в дальнейшем происходит с магнитными звеньями, нанизывающимися на проводник в процессе электромагнитной индукции тока, об этом мы скажем в главе V: „Природа электрического тока". Что же касается вопроса о самом возникновении индуктированного тока, т. е. о том, как совершается переход от картины, изображенной на рис. 25, к сложной схеме деформированного магнитного потока (рис. 26), то об этом пока можно только сказать, что повидимому, деформирование внешнего потока начинается вследствие некоторой механической реакции со стороны замкнутого проводника.

Необходимо еще обратить внимание на то обстоятельство, что в случае, изображенном на рис. 28, процесс преобразования магнитных линий пойдет в обратном порядке, если внешняя сила прекратит движение проводника слева направо, но ток поддерживается за счет другого источника, и предоставлено будет электромагнитной силе двигать проводник в обратном направлении, т. е. справа налево. Процесс „перерезывания" магнитных линий движущимся проводником с током в данном случае будет происходить следующим образом. Деформированные магнитные линии начнут выпрямляться, и самое это стремление их сократить свою длину, выпрямиться, именно и является, по Фарадею, причиной возникновения электромагнитной силы. Ясно, конечно, что по мере выпрямления, скажем, линии 3 и продвижения проводника с током справа налево находящаяся слева от проводника линия 2 начнет сближаться с некоторым магнитным звеном, нанизанным на проводник (рис. 27). На основании предыдущего понятно, что это сближение закончится слиянием этого звена с магнитной линией 2, которая при этом получит вид линии 3 на рисунке 28 и т. д. Одним словом, электромагнитный процесс, которым мы так широко пользуемся в электродвигателях, сопровождается снятием с токоведущего проводника магнитных звеньев, обязанных своим происхождением тому, что внешний генератор энергии возбуждает в цепи рассматриваемого проводника электрический ток. Энергия этого тока, расходуемая в электродвигателе, притекает извне от генератора к тому месту, где она преобразуется в механическую работу в процессе выпрямления деформированных магнитных линий, как это было выше указано.

Разберем еще один простейший случай преобразований магнитного потока в процессе электромагнитной индукции. Имеем (рис. 29) два параллельных проводника A_1B_1 и A_2B_2, составляющие части
72

двух замкнутых проводящих контуров.

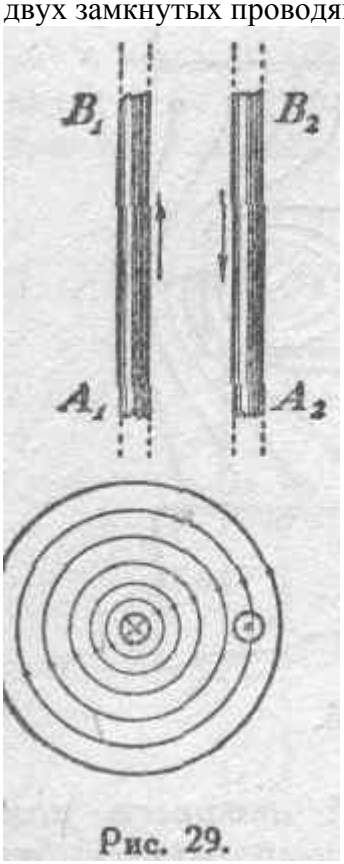


Рис. 29.

Как известно, при всяком изменении силы тока в первом из них, во втором возникает ЭДС. Эта ЭДС имеет такое направление, что ток, вызываемый ею, создает магнитный поток, стремящийся воспрепятствовать изменению силы тока в первом проводнике.

Рассмотрим случаи замыкания и размыкания первичной цепи. Стоя на точке зрения Фарадея и Максвелла, мы должны представлять себе, что основной энергетический процесс, характеризующий явление, которое мы называем электрическим током, имеет место не в самом проводнике, а в диэлектрике, его окружающем. Несомненно, далее, что когда мы имеем в какой-либо цепи электрический ток, то все, что происходит в самых отдаленных частях этой цепи, есть результат первичного процесса, имеющего место в генераторе. Мы имеем, вообще говоря, передачу энергии от генератора к приемнику и можем сказать, что энергия течет в этом направлении. Как именно течет, это — вопрос особый. Прежде уделялось преимущественное внимание тому, что происходит внутри проводника, и в связи с этим предполагалось, что электрическая энергия течет по проводникам подобно тому, как вода течет по трубам. В настоящее время мы признаем, что проводник играет лишь роль своего рода направляющей и что энергия передается по диэлектрику (известно, что мы имеем случаи передачи энергии и без проводов). Таким образом, появление магнитного поля в пространстве, окружающем проводник с током, можно рассматривать как результат притока Энергии от генератора к данному месту через диэлектрик, окружающий проводник. Во время установления электрического тока в проводнике мы имеем усиление магнитного поля вокруг него. Естественно предположить, как это и сделал Фарадей, что магнитные линии сначала появляются в непо-

средственной близости к проводнику и затем распространяются дальше: магнитные линии как бы раздуваются в радиальном направлении, заполняя пространство вокруг проводника. Это изменение диаметра контуров магнитных линий является одной из стадий преобразования магнитного потока в рассматриваемом случае. При замыкании первичной цепи и возникновении в ней тока, мы получим во втором проводнике *(A_2B_2)* ЭДС как результат пересечения его круговыми магнитными линиями, удаляющимися от первого проводника. При направлении тока в проводнике *A_1B_1,* указанном на чертеже стрелкой, мы найдем направление кольцевых магнитных линий по правилу штопора. Направление ЭДС в проводнике A_2B_2 найдем, применяя правило трех пальцев правой руки и имея в виду движение проводника *A_2B_2 относительно* магнитных линий. Эта ЭДС и создаваемый ею ток будут иметь направление, указанное на чертеже стрелкой, т. е. обратное направлению тока, возникающего в проводнике .A_1B_1.

При размыкании тока в проводнике *A_1B_1* процесс исчезновения магнитного поля происходит, по Фарадею, так, как будто упругие

73

магнитные линии в процессе -.преобразования магнитного потока стягиваются к проводнику со слабеющим током. В этом случае проводник *A_2B_2* пересекается магнитными линиями в противоположном направлении, и по тому же правилу трех пальцев мы найдем, что индуктированная в нем ЭДС создает ток того же направления, что и в проводнике A_1B_1.

Говоря здесь о „пересечении" проводника магнитными линиями, мы под этим процессом должны понимать рассмотренный выше «процесс почкования магнитных линий, являющийся другой стадией

преобразования магнитного потока в данном случае. А именно, возникающая (рис. 30) или исчезающая (рис. 31) магнитная линия, соответственно раздуваясь или стягиваясь, встречает на своем пути проводник *A_2B_2,* В результате встречи с проводником она может деформироваться и, вообще говоря, образовывать охватывающую проводник петлю, обращенную внутрь, т. е. к оси магнитных линий, в случае возникновения первичного тока, и наружу—в случае его исчезновения (рис. 30 и 31).

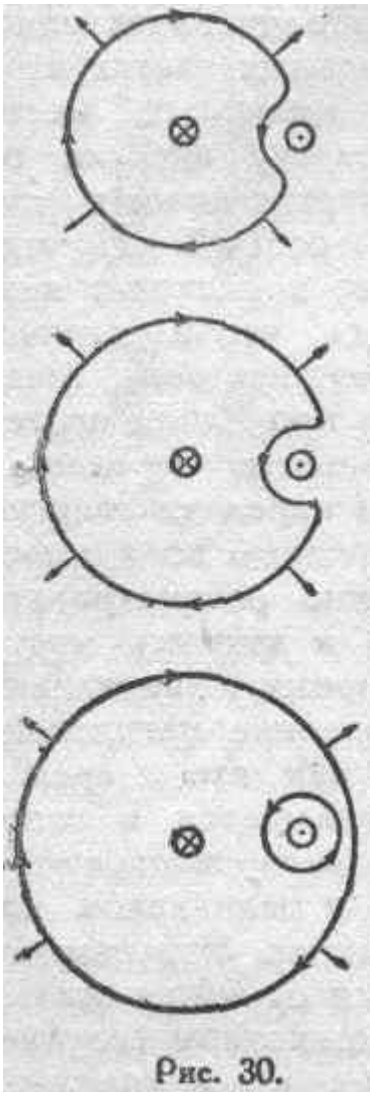


Рис. 30.

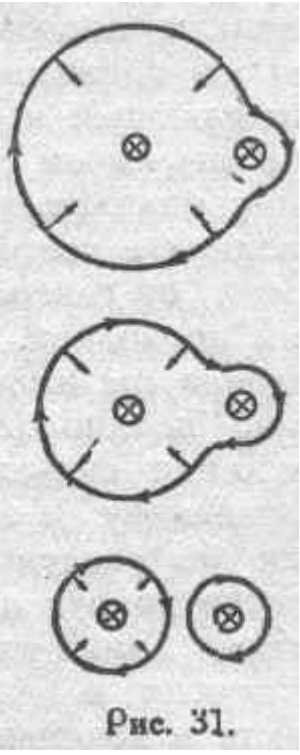


Рис. 31.

В дальнейшем, в результате слияния петель в перехвате, основные магнитные линии восстанавливаются в первоначальной кольцеобразной форме, на проводнике же A_2B_2 остается отпочковавшееся магнитное звено. Направление магнитной линии, составляющей это звено, очевидно, определяется направлением магнитной линии, от которой это звено отпочковалось, и, в свою очередь, дает нам непосредственно направление индуктированного тока (правило штопора). Таким образом мы видим, что можно найти направление ЭДС и тока, возникающих в проводнике в результате электромагнитной индукции, и не применяя различных мнемонических правил (напр., правила трех пальцев). Вообще, в тех случаях, когда применение этих правил почему-либо затруднительно (напр., в случае сложности схемы), следует представить себе картину движения и почкования магнитных линий; направление магнитной линии, составляющей отпочковавшееся звено, дает нам в связи с основным правилом штопора непосредственно направление возникающего в проводнике индуктированного тока.

74

[1]) Faraday, Experimental Researches in Electricity, Vol. 1, § 238.

[1]) Рисунки 26, 27 и 28 представляют собою по существу не что иное, как именно картину результирующего магнитного поля, получающегося от наложения поля тока на внешнее

магнитное поле. Такого рода картину в весьма полной форме дал Максвелл в своем „Трактате об электричестве и магнитизме" в приложении ко второму тому (см. таблицу XVII). То же, хотя и более грубо.

можно получить и при помощи железных опилков.

§ 13. Преобразования магнитного потока в трансформаторе.

Рассмотрим теперь *явления, происходящие в трансформаторе.* Здесь мы имеем две обмотки, электрически между собой не связанные, намотанные на один общий железный сердечник. Ради упрощения схемы допустим, что первичная и вторичная обмотки разнесены возможно дальше одна от другой (рис. 32). При описании явлений, происходящих в данном случае, обычно говорят, что изменение тока в первичной обмотке вызывает изменение магнитного потока, пронизывающего вторичные витки, что и является причиной возникновения в них ЭДС. Такое описание совершенно правильно, и ЭДС можно рассчитывать по формуле:

$e=-d\Phi/dt.$

Ясно, конечно, что и формула

$e=-dN/dt$

в этом случае также может быть применена, так как и тут изменение магнитного потока, пронизывающего вторичную обмотку, сводится к пересечению магнитными линиями элементов этой обмотки. Рассмотрим подробнее физический процесс, происходящий в данном: случае. Действительно, при возрастании тока в первичной обмотке от 0 до максимальной величины магнитные линии, возникая у каждого отдельного витка первичной обмотки, в процессе преобразования магнитного потока почти все сливаются в один общий для всех ее витков магнитный поток, который, распространяясь в окружающем пространстве и устремляясь в железо сердечника (сплошная стрелка на рис. 32), пересекает все элементы вторичной обмотки.

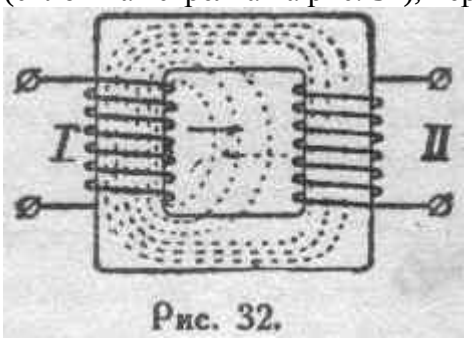


Рис. 32.

Тот же процесс преобразования магнитного потока, но в обратном порядке (пунктирная стрелка), имеем при убывании тока в первичной обмотке. Ясно, что это движение магнитных линий при усилении и ослаблении намагничивающего тока является причиной пересечения витков вторичной обмотки и в случае более близкого расположения обеих обмоток, как это обычно делается во всех трансформаторах. Наконец, при генерировании тока во вторичной обмотке трансформатора имеет еще место и рассмотренная в предыдущем параграфе стадия преобразования магнитного потока, состоящая в отпочковывании от первичного потока магнитных звеньев, нанизывающихся на элементы вторичной обмотки.

§ 14. Роль магнитных экранов.

Рассмотрим теперь некоторые примеры магнитного экранирования. Принцип непрерывности магнитных линий помогает нам разобраться в сущности явлений, происходящих в этих случаях.

75

В качестве первого примера возьмем магнитное экранирование, имеющее место, например, в зубчатых арматурах электрических машин (см. § 8). В этом случае зубцы экранируют утопленные во впадинах проводники, и последние находятся поэтому в сравнительно очень слабом магнитном поле. Однако, при прочих равных условиях, ЭДС, индуктированная в обмотках зубчатых арматур, в

точности равна ЭДС, индуктированной в обмотках машин с гладким якорем. Рассмотрим указанное явление подробнее. Для упрощения рассуждений возьмем отдельный разомкнутый проводник, движущийся в магнитном поле (проводник перпендикулярен плоскости чертежа, рис. 33).

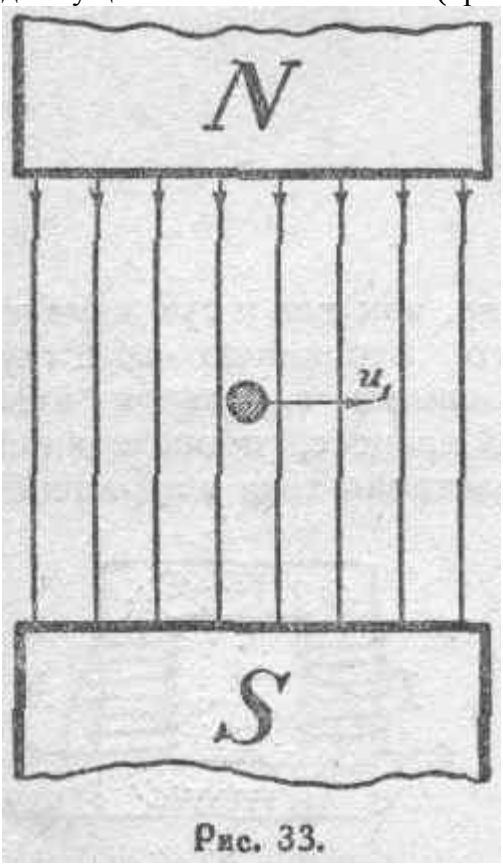


Рис. 33.

Пусть движение проводника происходит слева направо, перпендикулярно направлению поля и длине проводника, со скоростью u_1 в неподвижном магнитном поле. Если длина проводника есть l, то произведение lu_1 представит собою площадь, описанную при движении проводником в единицу времени; если далее B_1 — величина магнитной индукции, то число магнитных линий, пересеченных проводником в единицу времени, будет B_1lu_1, и для величины ЭДС будем иметь выражение:

$e=B_1lu_1$.

Чтобы яснее разобраться в явлении магнитного экранирования, нарисуем теперь приблизительную картину распределения магнитного поля в случае наличия экрана. Имеем то же самое магнитное поле, но проводник, движущийся с тою же видимою скоростью u_1, *в* данном случае окружен магнитной броней, т. е., например, помещен на всем протяжении поля в трубку из материала с большой магнитной проницаемостью μ (схематический рис. 34). Ясно, что броня изменит характер распределения магнитного потока, и общая однородность поля нарушится, так как вследствие большей магнитной проницаемости материала трубки последняя как бы втянет в себя магнитные линии как из участка поля вне трубки, так и из пространства внутри нее. Получится несомненное сгущение магнитного потока в стенках трубки и разрежение внутри нее, т. е. около проводника.

Применяя тот же прием расчета ЭДС, что и раньше, получаем:

$e=B_2lu_2$.

Здесь B_2 — величина магнитной индукции в пространстве около проводника в случае наличия магнитной брони; u_2—скорость движения проводника относительно магнитных линий, о величине которой мы пока ничего не знаем. Опыт показывает, что в случае одинаковой видимой скорости

движения проводника ЭДС, индуктированная в нем, имеет в обоих случаях одну и ту же величину, т. е. мы имеем право написать:

$B_1 l u_1 = B_2 l u_2$.

Справедливость этого равенства подтверждается повседневным опытом. Но столь же очевидно, что в полости внутри брони магнитная индукция обычно в согни раз меньше, чем вокруг незабронированного проводника. На основании предыдущего равенства имеем:

$u_1 B_1 = u_2 B_2$,

а отсюда

$u_2/u_1 = B_1/B_2$ (9)

Так как B_2 во много раз меньше, чем B_1, то равенство (9) приводит нас к заключению, что скорость u_2 должна быть во столько же раз больше u_1. Однако, мы условились, что забронированный проводник движется с той же видимой скоростью, что и проводник без брони в первом случае. Получается парадокс, попытки объяснения которого заполняли в свое время страницы многих электро-технических журналов. Рассчитывая величину индуктированной ЭДС по формуле $e = Blu$, понимая под B магнитную индукцию в полости внутри брони и под u—видимую скорость движения проводника в магнитном поле, получаем результаты, не соответствующие действительности. Для получения правильного результата расчетная скорость пересечения проводником магнитных линий (u_2) должна быть в случае наличия брони принята во столько раз большей, чем u_1, во сколько раз магнитная индукция слабее в полости внутри брони.

Отсюда мы приходим к заключению, что в случае брони мы имеем добавочную скорость встречного движения магнитных линий Δu, т. е.

$u_2 = u_1 + \Delta u$.

Появление добавочной скорости Δu объясняется тем, что область внутри брони оказывается как бы, сравнительно слабо проводящей магнитные линии, и для того, чтобы все магнитные линии успели пересечь проводник за время его перемещения, необходима некоторая добавочная скорость их движения.

Рис. 34 и 35 схематически поясняют происходящий при этом процесс.

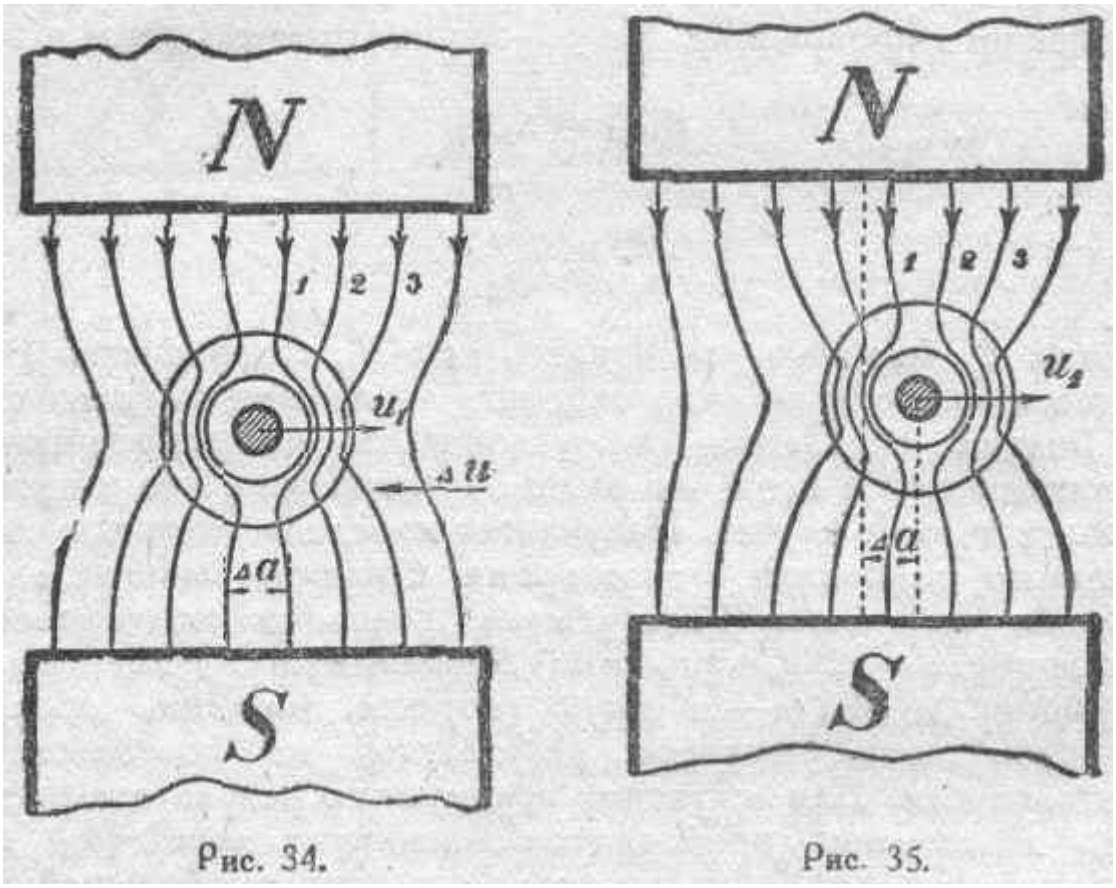


Рис. 34. Рис. 35.

Рассмотрим проводник в положении рис. 34. Магнитная линия № 1 при таком положении проводника проходит через правую часть сечения брони. Через некоторый промежуток времени, в течение которого проводник переместится на расстояние Да вправо, та же магнитная линия № 1 займет другое положение

77

и будет проходить через левую часть трубы (рис. 35), т. е. за тот же самый промежуток времени магнитная линия переместится влево на расстояние, приблизительно равное диаметру трубы. Ясно, что это может иметь место только в том случае, если магнитная линия будет иметь некоторую добавочную, встречную по отношению к движению проводника, скорость. Подобного рода добавочная скорость имеет место всегда, когда на пути движения какого-либо потока встречается местное сопротивление. Так, например, вода в реке, вместе сужения русла, получает добавочную скорость.

Для уяснения приведем еще одну аналогию, где механизм явления совершенно такой же. Представим себе некоторый цилиндр, заполненный водою (рис. *36*, I).

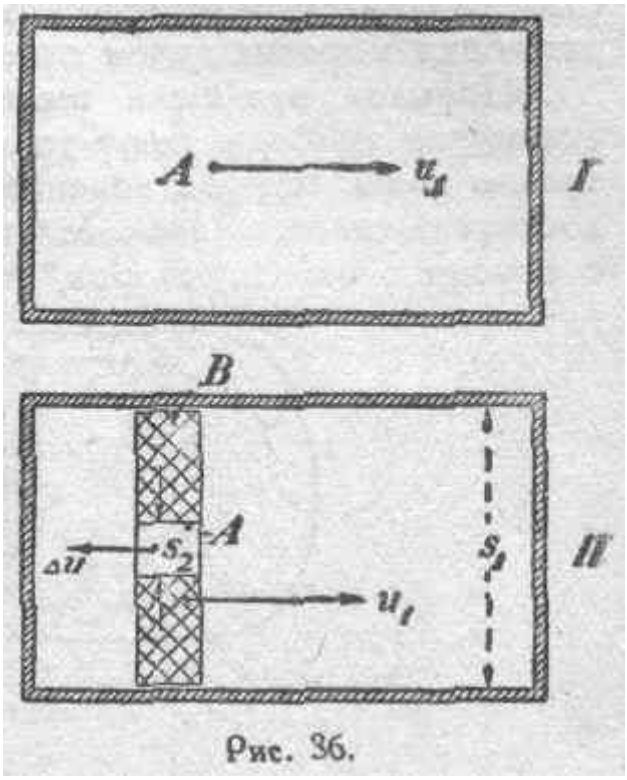


Рис. 36.

Пусть некоторая точка *A* движется вправо со скоростью u_1. Это будет скорость, с которой точка *A* перемещается относительно воды. Теперь представим себе другую картину: тот же сосуд, но с движущимся внутри него поршнем *B* (рис. 36, II), в середине которого сделан канал с поперечным сечением s_2. Если наша точка *A* жестко связана с внутренностью канала в поршне, то при движении поршня со скоростью u_1 точка *A* будет иметь ту же скорость u_1, т. е. свою прежнюю скорость. Но скорость ее относительно воды будет в этом случае другая. В самом деле, благодаря меньшей „проницаемости" (меньшему сечению) канала, вода, переходя из правой половины цилиндра в левую, получит при движении в канале добавочную скорость. И скорость встречи точки *A* с водой, т. е. скорость движения воды в канале поршня относительно самого поршня, будет:

$u_2=u_1+\Delta u$,

причем ясно, что

$u_2/u_1=s_1/s_2$,

где s_1 — поперечное сечение цилиндра.

Совершенно подобным же образом происходит дело и в случае движения забронированного проводника в магнитном поле. За промежуток времени τ, при видимой скорости движения u_1, будет пройден путь:

$a=\tau u_1$.

При этом проводник пересечет весь поток, встречающийся по длине этого пути, и ни одна магнитная линия не избегнет пересечения. Но плотность потока в непосредственной близости от проводника (т. е. индукция *B)* будет различна в случаях экранированного и неэкранированного проводников, различна будет также и относительная скорость пересечения ими магнитного потока. Понимание происходящего процесса затруднительно для нас потому, что мы не можем видеть магнитных линий следовательно, не можем видеть и их добавочного движения. Но только так, как изложено выше, можно понимать механизм рассматриваемого явления, если исходить из принципа непрерывности магнитного потока и фарадеевского представления о физически существующих магнитных линиях.

В качестве не аналогии и не примера, а только иллюстрации, рекомендуется проделать следующий опыт. Проведем ряд параллельных линий на равном расстоянии друг от друга (рис. 37).

Рис. 37.

Если мы станем рассматривать эти линии через лупу, видимое расстояние между ними увеличится. Будем двигать лупу слева направо. При этом все линии пройдут перед нашими глазами, причем мы ясно ощутим добавочную скорость, с которою линии перебегают справа налево. Такую же картину мы, вероятно, увидели бы в случае (рис. 34), если бы обладали способностью видеть магнитные линии.

Сопоставляя содержание настоящего параграфа с тем, что сказано выше о тождественности двух формулировок закона электромагнитной индукции (7) и (8), мы приходим к заключению, что так называемое экранирование по существу не изменяет ни качественного ни количественного характера происходящего явления, так как при этом число перерезываемых проводником магнитных линий в общем совершенно

79

не меняется при наличии экрана. Это положение значительно помогает нам разбираться в устройстве и действии различных электромагнитных механизмов с железом.

В качестве примера неправильного истолкования роли экрана и игнорирования принципа непрерывности магнитного потока упомянем об имевшей лет 20 тому назад место попытке осуществления электрического тахометра, указывающего скорость движения морских судов относительно земли.

Попытка эта была вызвана тем обстоятельством, что существующие приборы дают только скорость движения судна относительно воды. Существование морских течений, скорость которых достигает иногда значительной величины, не дает возможности с помощью этих приборов, не прибегая к специальным поправкам, определить действительное расстояние, пройденное судном. Принцип устройства проектированного тахометра заключался в следующем (рис. 38).

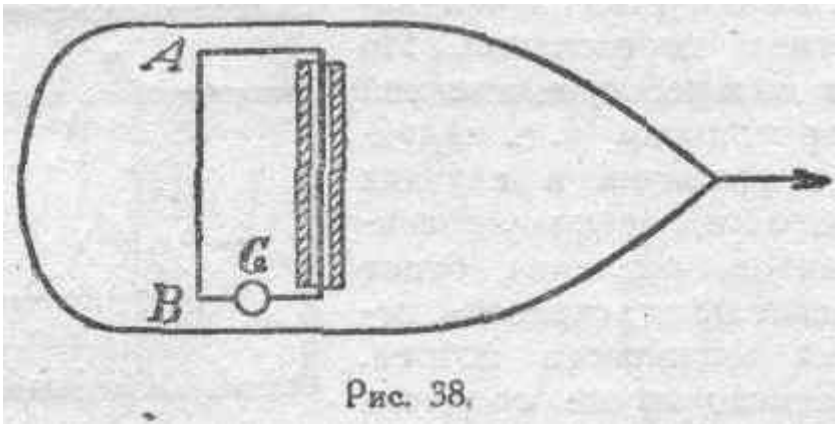


Рис. 38.

Если протянуть поперек судна провод *AB*, то при движении корабля этот провод будет пересекать вертикальную составляющую земного магнитного поля. В результате пересечения мы будем иметь индуктированную ЭДС, которую, казалось бы, можно обнаружить, включив в цепь указанного проводника гальванометр G. Однако, очевидно, что при таком осуществлении схемы в проводнике, замыкающем цепь, также будет индуктироваться ЭДС, по величине равная, но по направлению противоположная той, которая будет возникать в проводе *AB*. В результате гальванометр не дает никакого отклонения. Тут-то и возникла мысль уменьшить эту обратную ЭДС, заключив соответствующую часть проводника в броню (напр., уложив его в железную трубу). К удивлению изобретателей, такая предохранительная мера ни к чему не привела: гальванометр попрежнему не давал никаких отклонений. После всего изложенного выше нам должно быть ясно, что иного результата и нельзя было ожидать.

Теперь вернемся еще раз к вопросу о гладких и губчатых арматурах, чтобы отметить одно крайне любопытное обстоятельство. Напомним, что переход к зубчатым арматурам был вызван осознанной необходимостью более надежно укрепить обмотку машины. Не трудно убедиться, что приложенные к отдельным элементам обмотки электромагнитные силы, т. е. силы взаимодействия между магнитным полем и проводником, несущим ток, направлены

80

по касательной к окружности якоря. В случаях коротких замыканий эти силы достигают очень больших значений и могут быть причиной разрушения гладкой арматуры. Укладывая проводники во впадины арматуры, мы создаем опору, препятствующую этим силам смещать проводники.

Сравним теперь величины электромагнитных усилий для проводника, лежащего на гладкой поверхности якоря, и для проводника, утопленного во впадине. Величина электромагнитной силы, приложенной к одному такому проводнику, будет:

$f=Bli\sin\theta$,

где B — магнитная индукция, l — длина проводника, i — сила тока в проводнике и θ — угол между проводником и направлением B. В рассматриваемом случае $\theta=90°$, а следовательно, $\sin\theta=1$. Сравнивая величину механического усилия, рассчитанного по этой формуле для случая арматур гладкой и зубчатой и принимая во внимание что, при наличии зубцов, величина магнитной индукции вокруг проводника значительно меньше, мы приходим к заключению, что в случае зубчатой арматуры сила, стремящаяся сорвать проводник с якоря, будет также соответственно меньше, чем при гладком якоре. Это заключение подверглось тщательной проверке в опытах английского электротехника Мордэя, подтвердившего, что механические усилия, приложенные к утопленному во впадине проводнику, действительно ничтожны. Таким образом, мы приходим к несколько парадоксальному выводу: укрепляя проводник зубцами якоря, мы тем самым как бы делаем это крепление в значительной степени ненужным. Точное обследование показало, что точка приложения

электромагнитной силы переносится в случае зубчатой арматуры *с* проводника на зубцы якоря. Это явление можно объяснить неравномерным распределением магнитного поля в междужелезном пространстве, а именно сгущением магнитных линий против зубцов якоря и вместе с тем нарушением общей симметрии магнитного поля под влиянием реакции якоря, как это схематически изображено на рис. 39.

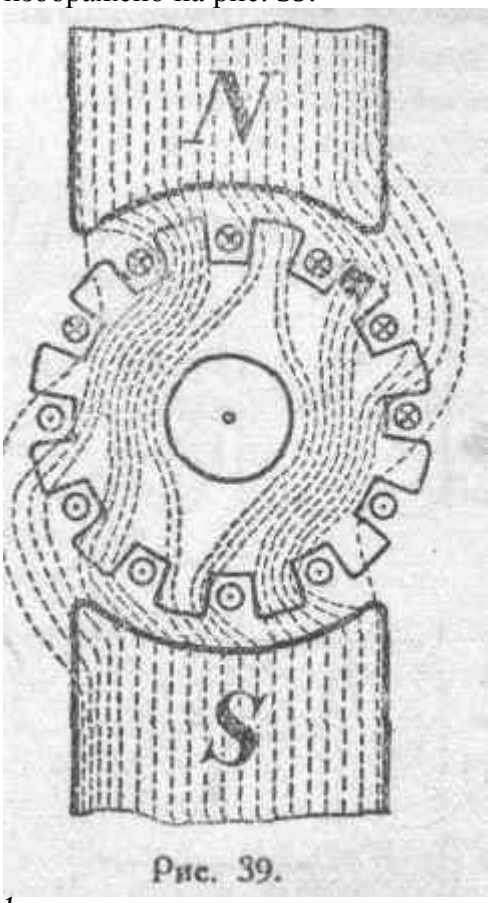


Рис. 39.

[1]***) Ясно, что физический характер явления не зависит от того, движется ли проводник или же магнитная система. В современных электромагнитных механизмах встречается и то и другое: в обычных динамомашинах постоянного тока якорь движется в магнитном поле, в больших альтернаторах вращаются магниты.***

§ 15. Проблема бесколлекторной машины постоянного тока.

В заключение наших рассуждений о различных случаях электромагнитной индукции тока займемся вопросом о возможности осуществления бесколлекторной машины постоянного тока.

81

До настоящего времени встречаются изобретатели, которые работают над разрешением этой неразрешимой проблемы. Попытки подобного рода вызываются тем обстоятельством, что коллектор в машине постоянного тока является наиболее сложной конструктивной деталью, уход за которой доставляет не мало забот при эксплоатации машины.

Все указанные попытки основаны на игнорировании сущности закона электромагнитной индукции, на упущении из вида того, что невозможно путем чистой индукции без всякой коммутации получить постоянную, сколь угодно длительно существующую ЭДС.

В самом деле, известно, что величина индуктированной в контуре ЭДС определяется соотношением (8):

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Из этой формулы ясно, что для получения ЭДС постоянного направления совершенно необходимо, чтобы изменение магнитного потока, охватываемого контуром, было все время одного знака, Создать такой непрерывно и беспредельно возрастающий (или убывающий) магнитный поток мы не в состоянии, а следовательно, и получение путем чистой электромагнитной индукции постоянной ЭДС невозможно в случае неизменяемого контура.

Для ясности дальнейшего изложения необходимо оговориться, что диск Фарадея или униполярная дисковая машина не являются машинами бесколлекторными. В этом случае мы имеем непрерывное коммутирование, ибо под щетку все время подходят новые и новые радиальные элементы диска. Таким образом, здесь мы имеем коллектор в скрытом виде; когда же говорят о бесколлекторной машине постоянного тока, то электрическую цепь предполагают неизменяемою в тех местах, где индуктируется ЭДС.

Многочисленные проекты бесколлекторных машин постоянного тока, не давшие, как и следовало ожидать, никаких практически результатов, можно разбить на две главных группы. В основу проектов первой группы обычно положена бронировка части проводников от магнитного поля. Пример подобной машины изображен на рис. 40 в двух проекциях.

82

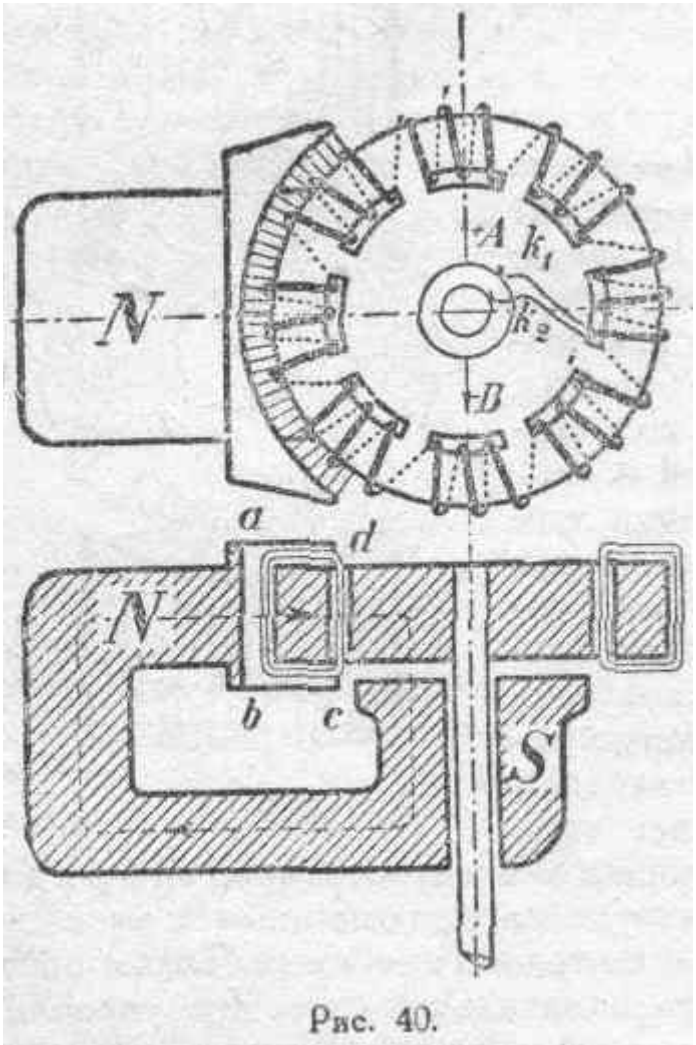


Рис. 40.

В качестве подвижной части машины был взят железный диск, вращавшийся вокруг оси. В диске имелся ряд прорезов, сквозь которые пропускалась обмотка, более или менее равномерно покрывавшая обод. Арматура помещалась в поле подковообразного магнита или электромагнита, расположенного как показано на рис. 40, причем магнитные линии, исходящие из северного

полюса, пройдя через междужелезное пространство, пронизывали тело диска и исходили из него в центральной части, лишенной обмотки. В силу большой магнитной проницаемости железа, магнитные линии должны замыкаться главным образом через сплошные части диска, и поэтому элементы обмотки, расположенные в прорезах, окажутся в очень слабом магнитном поле. Поэтому при расчете подобных машин авторы проектов ошибочно принимали во внимание только элементы обмотки на участке *ab*, лежащие непосредственно против полюса, предполагая, что в проводниках, помещенных в прорезах диска, никакой или почти никакой ЭДС индуцироваться не будет. Осуществление машины на практике жестоко обмануло ожидания конструкторов. Построенная машина давала, вместо ожидаемой постоянной ЭДС значительной величины, переменную ЭДС порядка десятых долей вольта. Для нас должно быть ясно, что иных результатов и нельзя было ожидать, так как ослабление магнитного поля в прорезах диска происходит лишь вследствие перераспределения основного потока, а не за счет уменьшения его на части пути. Принцип замкнутости магнитного потока приводит нас к заключению, что применение экрана ни в малейшей степени не уменьшает числа перерезываемых проводником магнитных линий за время одного оборота арматуры. В данном случае элементы обмотки, находящиеся в прорезах (на участке *cd),* пересекут за время одного оборота диска такое же число магнитных линий, как и расположенные вне прорезов (на участке *ab).* Найдя по правилу трех пальцев правой руки направление индуктированной ЭДС, мы убедимся в наличии в контуре двух ЭДС, равных по величине и обратных по направлению. Можно сказать, что вообще все подобные проекты, пытающиеся использовать экранирование проводников, основаны на недоразумении, как это ясно из §§ 8 и 14. В более сложных и запутанных схемах разобраться бывает гораздо труднее, но в принципе все они грешат одним и тем же.

Появление небольшой по величине переменной ЭДС объясняется присутствием на диске прорезов. Поток, создаваемый магнитной системой, встречает благодаря этому в разные моменты разное сопротивление и получает таким образом пульсирующий характер. Пульсация потока и является причиной возникновения переменной ЭДС. Разберем теперь другой тип проектов бесколлекторных машин постоянного тока, а именно машины, построенные на принципе синхронного изменения самоиндукции контура. Пусть в некотором замкнутом контуре генерируется переменная ЭДС и пусть закон изменения этой ЭДС будет:

$e=E_m \sin\omega t$,

где e — мгновенное значение ЭДС, а E_m — ее наибольшее значение. Мы знаем, что изменение во времени такой ЭДС графически можно изобразить кривой, указанной на рис. 41.

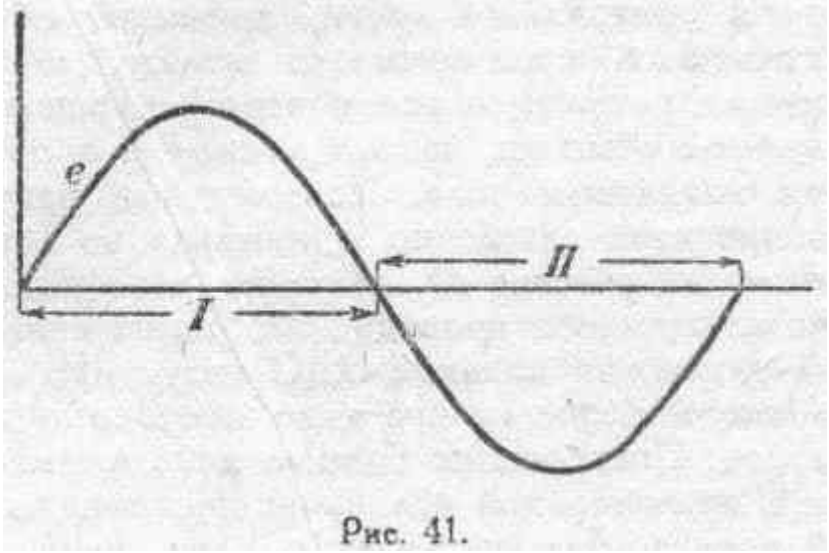


Рис. 41.

Представим себе, что в цепь, в которой индуктируется переменная ЭДС *e*, включена некоторая система с коэффициентом самоиндукции *L* (рис. 42), изменяющимся синхронно с изменением *e* так, что во время первой половины периода *L* меньше, чем во время второй.

Рис. 42.

На практике подобную систему с переменным коэффициентом самоиндукции можно легко осуществить.

Мы знаем, что если при наличии некоторой постоянной ЭДС замкнуть цепь, обладающую коэффициентом самоиндукции *L* и сопротивлением г, то сила тока не устанавливается мгновенно, а нарастает до величины

$\frac{e}{r}$ постепенно по закону:

$$i = \frac{e}{r}\left(1 - \varepsilon^{-\frac{r}{L}t}\right),$$

где ε — основание натуральных логарифмов. В начальный момент времени, когда t=0 и i=0. В дальнейшем сила тока растет, ассимптотически приближаясь к величине — (рис. 43).

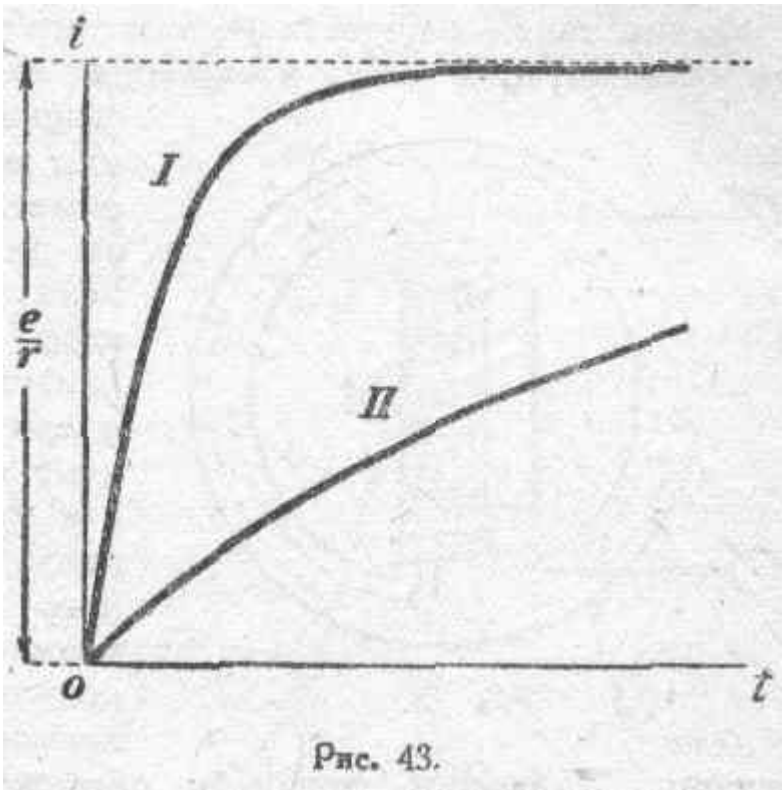


Рис. 43.

Теоретически процесс нарастания тока продолжается бесконечно долго. Та же аналитическая зависимость между *i, t, L* показывает, что чем больше коэффициент самоиндукции *L*, тем медленнее возрастает сила тока в цепи. На рис. 43 кривая I изображает закон нарастания силы тока в цепи с малым коэффициентом самоиндукции, а кривая II — в цепи с большим коэффициентом самоиндукции.

Вернемся к рассматриваемому проекту бесколлекторной машины постоянного тока. Осуществляя синхронно изменяющийся коэф-

84

фициент самоиндукции так, чтобы для первого и второго полупериодов (рис. 41) было

$L_1 < L_2$,

мы получаем различные условия для установления силы тока в течение первой и второй половины периода. Казалось бы, что за время положительной полуволны (рис. 44), когда L_1 мало, сила тока свободно возрастает до величины i_1, а за время отрицательной полуволны, благодаря наличию большого коэффициента самоиндукции, сила тока не в состоянии будет возрасти до величины i_1, и мы достигнем за вторую половину периода силы тока равной i_2, причем $i_2 < i_1$.

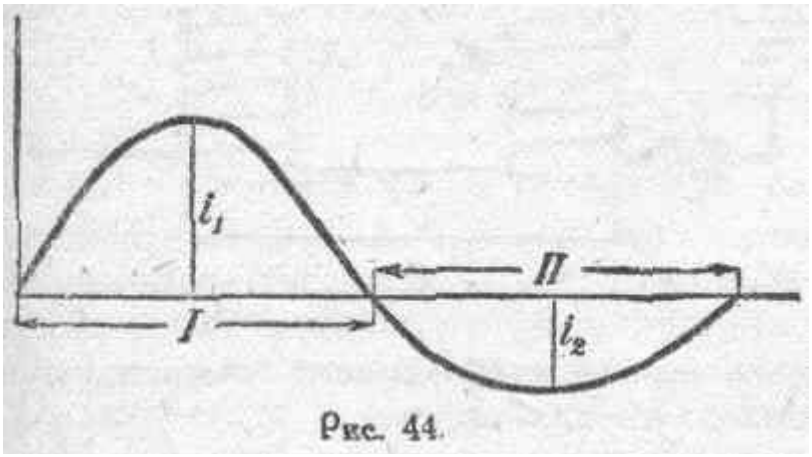


Рис. 44.

Средняя сила тока за полный период, определяемая выражением

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T i\,dt$$

и равная для обычного симметричного переменного тока нулю, в данном случае как будто должна иметь некоторое определенное конечное значение. Физически это соответствовало бы наложенную на волну переменного тока некоторой постоянной составляющей.

Отсеивая в дальнейшем переменную составляющую, мы могли бы получить чистый постоянный ток.

Оставим пока разбор этого утверждения и займемся вопросом о практическом осуществлении системы с синхронно изменяющимся коэффициентом самоиндукции, над чем именно и работали обычно некоторые изобретатели бесколлекторных машин постоянного тока. Одной из простейших систем такого рода может служить статор указанной на рис. 45 формы, между полюсами которого помещен железный сердечник *A*.

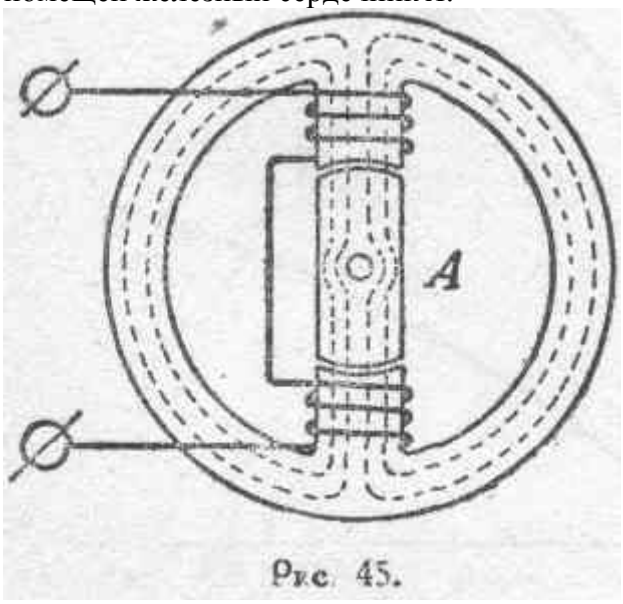


Рис. 45.

Изменение коэффициента самоиндукции этой системы достигается вращением сердечника вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка. В самом деле, коэффициент самоиндукции системы будет наибольший, когда сер-

85

дечник находится на линии полюсов, и наименьший, когда он расположен перпендикулярно к ней. Если для вращения сердечника применить синхронный двигатель или, что еще проще, закрепить сердечник на валу соответствующего альтернатора, генерирующего интересующую нас ЭДС, то изменение коэффициента самоиндукции описанной системы будет происходить синхронно с изменением ЭДС.

Можно также осуществить систему с переменным коэффициентом самоиндукции и без вращающих частей, используя явление насыщения железа. Возьмем, например, железный сердечник с двумя обмотками K_1 и K_2, изображенный на рис. 46, и будем питать обмотку K_1 от источника постоянного тока.

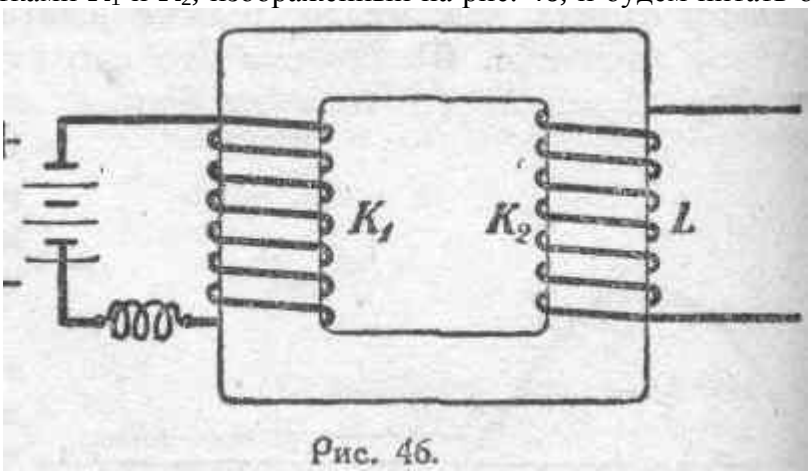


Рис. 46.

Обратимся к кривой намагничения железа (рис. 47) и допустим, что в некоторый момент в обмотке, предназначенной для переменного тока, сила тока равна нулю.

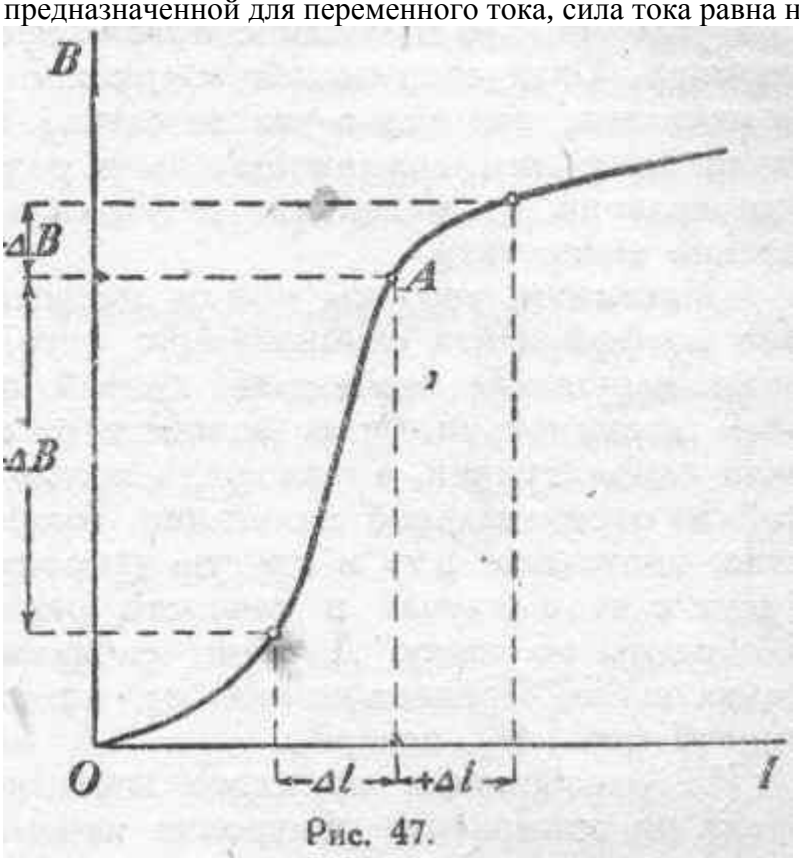


Рис. 47.

Пусть силе постоянного тока, проходящего по обмотке K_1, соответствует магнитное состояние сердечника, определяемое точкой *A* кривой намагничеиия. Приложим теперь к обмотке K_2 переменную ЭДС. Характер кривой намагничения указывает, что если переменная ЭДС стремится увеличить существующий магнитный поток, то для некоторого приращения силы тока Δi мы будем иметь сравнительно малое приращение ΔB. Наоборот, такое же по абсолютной величине приращение

силы тока, но в обратной направлении, даст значительное изменение магнитной индукции. Таким образом, наше устройство будет иметь малый коэффициент самоиндукции для одного полупериода и большой—для другого.
Вернемся теперь к вопросу о возможности выпрямления переменного тока без коммутирования при помощи систем с синхронно изменяющимся коэффициентом самоиндукции. Как и следовало ожидать, практических результатов описанные попытки не дали,
86

хотя в разное время и были затрачены на это не малые средства, между прочим, в крупными промышленными предприятиями. Если включить в цепь, состоящую из источника переменной ЭДС и системы с синхронно изменяющимся коэффициентом самоиндукции *L* амперметр типа Депре д'Арсонваля (магнитоэлектрический), то он не даст никакого отклонения, что указывает на неправильность рассуждений авторов описанных проектов.
Разберемся в данном вопросе и убедимся в том, что никаких положительных результатов от подобных опытов, основанных на неправильном понимании закона электромагнитной индукции, нельзя было и ожидать. В самом деле, при рассмотрении ЭДС, действующих в данном контуре, нельзя оперировать с одной только внешней приложенной переменной ЭДС и игнорировать другие, возникающие в контуре ЭДС. Иными словами, необходимо учесть все магнитные потоки, связанные с рассматриваемой цепью, и рассчитать результат их совокупного действия. В приведенных выше примерах несомненно, кроме внешней ЭДС, имеется еще ЭДС самоиндукции. *По какому бы закону ни изменялся коэффициент самоиндукции L*, мы имеем право написать для ЭДС, действующих в контуре:

$$\Sigma e = E_m \sin \omega t - \frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\Phi_0}{dt} - \frac{d\Phi_s}{dt} = -\frac{d(\Phi_0 + \Phi_s)}{dt},$$

где Φ_0 — основной поток генератора, связанный с контуром, а Φ_s— поток самоиндукции. Приведенное выражение для ЭДС дает нам возможность утверждать, что подобным путем нельзя получить составляющей постоянного тока, ибо для этого надо было бы иметь беспредельное возрастание или убывание результирующего потока, сцепляющегося с контуром рассматриваемой цепи.
В дополнение к тому, что было сказано выше на эту тему, обратимся к основной формулировке закона электромагнитной индукции, данной в первоначальном виде Фарадеем. Эта формулировка (6) гласит следующее:
q=-N/r.
87

Применим этот закон электромагнитной индукции к рассматриваемому нами примеру. Ясно, что $N=\Delta(\Phi_0+\Phi_s)$, т.е. число пересеченных контуром за некоторый промежуток времени магнитных линий равно изменению полного потока, охватываемого этим контуром. Мы имеем принципиально неизменяемый контур, сопротивление которого *r* постоянно. Для того чтобы средняя сила тока за период была отлична от нуля, необходимо, чтобы количества электричества, протекающие за каждый из смежных полупериодов, были бы не одинаковы. Последнее возможно (при *r*=const) только при условии, что изменение потока неодинаково для двух половин периода. Физически подобное явление при установившемся режиме невозможно, так как в таком случае магнитный поток, охватываемый контуром, должен был бы в результате изменяться в одном направлении, и магнитная деформация должна была бы беспредельно возрастать.
Максимум, чего мы можем достигнуть при синхронном изменении коэффициента самоиндукции, есть лишь искажение формы или даже нарушение симметрии кривой переменного тока. Характер

этой дисимметрии будет зависеть от закона изменения коэффициента самоиндукции, но площади кривой тока за время положительной и отрицательной пульсации тока, т. е. количества электричества, протекшие в ту и другую сторону за время полного периода, будут в этом случае в точности равны по абсолютной величине и обратны по знаку. Другими словами, средняя сила тока будет равна нулю. Предположения же, на которых основано построение кривой (рис. 44), неверны.

Из разобранных примеров ясно, что ни магнитное экранирование ни применение синхронно изменяющегося коэффициента самоиндукции не дают нам возможности получить в неизменяемом контуре составляющую постоянного тока и постоянной ЭДС.

Закон электромагнитной индукции (особенно в основной формулировке Фарадея) с совершенной очевидностью указывает, что для получения постоянного тока путем индукции в неизменяемом контуре остается только один путь, а именно путь синхронного изменения сопротивления цепи. На практике мы и пользуемся этим методом. Существует целый ряд систем выпрямителей, основанных на таком принципе, т. е. на изменении сопротивления цепи для одного полупериода переменного тока (напр., ртутные, синхронно-контактные и т. п.). В обычных же машинах постоянного тока мы не имеем неизменяемого контура, так как благодаря наличию коллектора под щетку подходят все время новые и новые элементы обмотки.

[1]) Приборы с постоянными магнитами учитывают среднее значение силы тока и поэтому при чисто переменном токе не дают никакого отклонения.

[1]) При построении кривой намагничения B=f(H), по оси абсцисс будем откладывать силу тока, пропорциональную H, причем под силой тока будем понимать сумму сил токов постоянного и переменного: i=i'+i".

[1]) Математическая сторона этого вопроса весьма обстоятельно разобрана в работе Г. А. Акимова-Перетца „Проблема бесколлекторной машины постоянного тука", в извлечении напечатанной в „Электричестве", 1924 г., № 8, стр, 381.

§ 16. Магнитная цепь.

Из изложенного в предыдущих параграфах мы знаем, что магнитный поток всегда проходит по некоторой замкнутой цепи. Такая „магнитная цепь", или „магнитопровод", имеется во всяком электромагнитном устройстве или механизме, и правильное кон-

струирование последних в значительной степени зависит от уменья рассчитать магнитную цепь.

Оказывается, величину магнитного потока можно весьма просто связать, с одной стороны, с общими причинами его возникновения и, с другой стороны, с геометрическими и физическими характеристиками частей магнитной цепи, совершенно подобно тому, как мы связываем величину электрического тока с величиной ЭДС и геометрическими и физическими характеристиками электрической цепи.

Заметим, что такая функциональная зависимость не является специфическим свойством, присущим исключительно магнитному потоку или электрическому току, что интенсивность всех вообще процессов кинетического характера является аналогичной функцией причин, их вызывающих, и обстоятельств, при которых они протекают.

§ 17. Линейный интеграл магнитной силы.

Закон магнитодвижущей силы. Представим себе некоторую точку A_1 расположенную в магнитном поле (рис. 48).

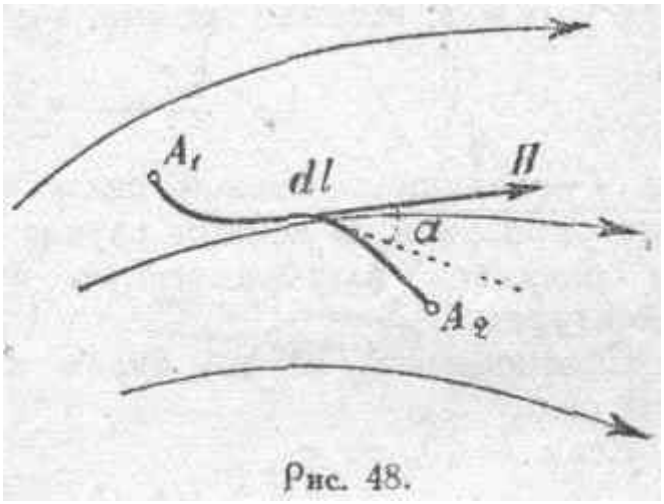


Рис. 48.

Пусть магнитная сила поля в этой точке будет Н. Составим выражение:

$H\cos\alpha dl$,

где dl — элементарное перемещение вдоль некоторого пути перехода от точки A_1 до точки A_2, а α — угол между направлением этого перемещения и направлением магнитной силы поля.

Как мы уже знаем, величина механической силы, действующей на единицу северного (положительного) магнитизма, помещенную в данной точке поля, численно равна H, и, следовательно, составляющая этой силы по направлению перемещения точки A численно будет равна $H\cos\alpha$. Поэтому произведение

$H\cos\alpha dl$

дает нам численную величину работы, совершаемой силами магнитного поля при элементарном перемещении единицы северного магнитизма. Интеграл от этого выражения, взятый вдоль конечного отрезка некоторой линии (напр. A_1A_2):

$$\int_{A_1}^{A_2} H\cos\alpha\, dl$$

дает численную величину работы, совершаемой при таком конечном перемещении единицы северного магнитизма, и называется *линейным интегралом магнитной силы* вдоль отрезка A_1A_2. Этот ин-

теграл называется также *разностью магнитных потенциалов* точек A_1 и A_2 или *магнитодвижущей силой*, действующей на данном пути перехода от точки A_1 до точки A_2. Основания для введения термина „магнитодвижущая сила" будут выяснены в § 18. Аналогичный интеграл в учении об электрическом поле носят, как известно, название разности электрических потенциалов.

Нас сейчас интересует величина линейного интеграла магнитной силы в одном частном случае, именно, когда линия, вдоль которой мы берем интеграл, представляет собою замкнутый контур. Значение величины

$$\oint H\cos\alpha\, dl$$

в этом частном случае облегчает описание и расчет магнитных цепей (знаком „$\oint$" мы указываем, что интегрирование производится ко замкнутому контуру).

Обследование вопроса показывает, что величина

$\oint H \cos \alpha \, dl$

зависит только оттого, будет ли наш контур (будем называть его „контуром интегрирования") сцепляться с каким-либо контуром тока или нет. Именно, можно доказать, что

$$\oint H \cos \alpha \, dl = 4\pi I, \qquad (10)$$

где I—величина полной силы тока, сцепляющегося с контуром .интегрирования. В данном случае под величиной полной силы тока мы разумеем алгебраическую сумму сил токов, сцепляющихся с контуром.

Соотношение (10) мы будем называть *законом магнитодвижущей силы*.

Если I=0, то и

$$\oint H \cos \alpha \, dl = 0,$$

т. е. работа, совершаемая силами магнитного поля при перемещении единицы северного магнитизма по замкнутому контуру, не сцепляющемуся ни с каким контуром тока, равна 0. Таким образом, мы можем вообще сказать, что величина выражения

$\oint H \cos \alpha \, dl$

является мерою силы тока, сцепляющегося с контуром интегрирования.

Докажем сначала справедливость равенства

$\oint H \cos \alpha \, dl = 4\pi I$

.для простейшего случая.

Возьмем какой-либо контур тока (на рис. 49 он изображен в разрезе) и некоторую замкнутую линию, показанную на рис. 49 пунктиром и сцепляющуюся с контуром тока. Ее мы и примем за

контур интегрирования.

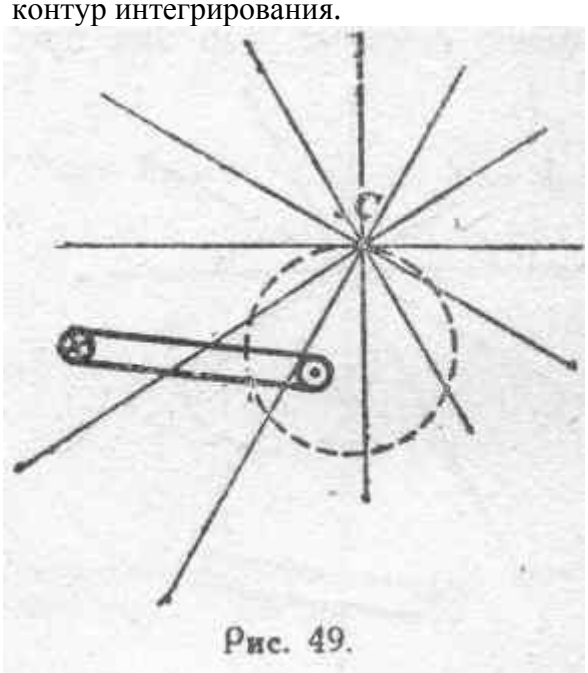


Рис. 49.

Представим себе на этой линии в точке С некоторое количество магнитизма, равное m. Оно может перемещаться под влиянием создаваемого током магнитного поля, я, следовательно, силами этого

поля может быть совершена некоторая работа. Если вообще при относительном перемещении контура тока и магнитного поля происходит изменение потока, пронизывающего контур, то работа, затрачиваемая на это перемещение, равна, как известно, произведению из силы тока в контуре на величину изменения пронизывающего его потока, т. е.

$dA=I \cdot d\Phi$.

Принимая в рассматриваемом данном случае I=const, мы можем написать это выражение не в дифференциальной форме, а в форме конечных разностей:

$\Delta A=I \cdot \Delta\Phi$,

на основании чего заключаем, что работа, совершаемая за промежуток времени, соответствующий некоторому конечному перемещению количества магнитизма m, равна произведению силы тока на полное изменение за данный промежуток времени потока, сцепляющегося с контуром тока, или, рассуждая по Фарадею, произведению из силы тока на полное число пересечений магнитных линий с контуром тока.

Чтобы рассчитать это число пересечений для случая перемещения количества магнитизма m вдоль рассматриваемого замкнутого контура, вспомним, что с этим количеством магнитизма связан поток $\Phi=4\pi m$. Так как для нас по существу важно лишь *относительное* перемещение магнитного потока к контура с током, то для большей ясности можно предположить, что магнитная масса m остается неподвижной в точке С, а контур с током, оставаясь параллельным самому себе, перемещается таким образом, что точка С с находящейся на ней магнитной массой опишет *относительно* контура тока как раз замкнутую линяю, помеченную на рис. 49 пунктиром, пройдя при этом сквозь контур тока. Полное число магнитных линий, пересеченных контуром тока при таком перемещении, будет очевидно $4\pi m$, т. е.

$\Delta\Phi=4\pi m$.

Следовательно, работа, произведенная силами магнитного поля, при этом перемещении будет:

$\Delta A=I\Delta\Phi=4\pi mI$.

Так как, с другой стороны, магнитная масса m при таком перемещении контура с током опишет в магнитном поле последнего замкнутую линию, то

$$\Delta A = m \oint H \cos \alpha \, dl .$$

Следовательно,

$$\oint H \cos \alpha \, dl = 4\pi I ,$$

что и требовалось доказать.

Если контур интегрирования сцепляется не с одним, а с несколькими контурами токов, то мы должны были бы ввести в расчет алгебраическую сумму этих токов, т. е. написать:

$$\oint H \cos \alpha \, dl = 4\pi \Sigma I .$$

Если бы мы перемещали магнитную массу m вдоль такого замкнутого контура, что она при этом не проходила бы сквозь контур тока, т. е. если бы контур интегрирования не сцеплялся с контуром тока (рис. 50), то число линий, пересеченных контуром тока в одном направлении, было бы равно числу линий, пересеченных им в направлении противоположном.

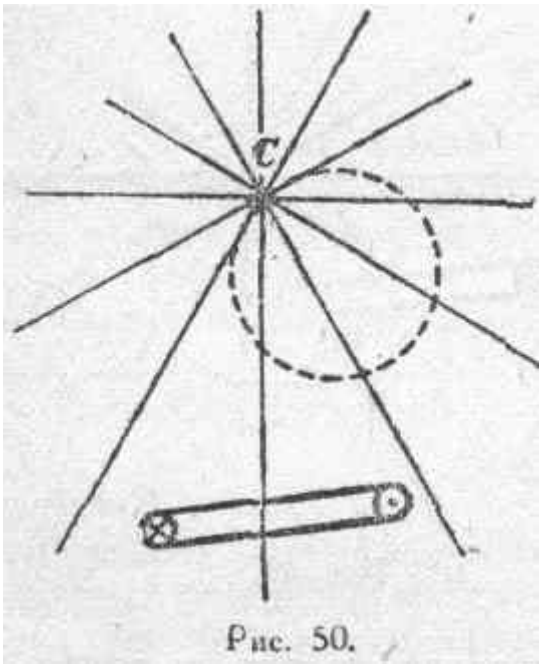


Рис. 50.

В таком случае результирующее изменение потока было бы равно нулю:
$\Delta\Phi=0$,
а следовательно,

$$\Delta A = I\Delta\Phi = m\oint H\cos\alpha\, dl = 0$$

и

$$\oint H\cos\alpha\, dl = 0.$$

Таким образом, на величину линейного интеграла

$$\oint H\cos\alpha\, dl,$$

взятого по замкнутому контуру, не влияют никакие токи, расположенные хотя и сколь угодно близко от контура интегрирования, но не сцепляющиеся с ним.
Мы доказали справедливость закона магнитодвижущей силы:

$$\oint H\cos\alpha\, dl = 4\pi I$$

на примере некоторого частного случая. Так как, однако, в ходе этого доказательства мы не делали никаких допущений, сколько-нибудь ограничивающих общность наших рассуждений, то мы имеем
92

право утверждать, что и полученный нами результат имеет вполне общее значение, т. е. что всегда имеет место соотношение:

$$\oint H\cos\alpha\, dl = 4\pi I,$$

т. е. что линейный интеграл магнитной силы, взятый вдоль любого замкнутого контура, всегда равен произведению полной силы тока, сцепляющегося с этим контуром, на 4π[1]).

[1]) Покажем, как из полученного нами закона магнитодвижущей силы:

$$\oint H \cos\alpha \, dl = 4\pi I$$

можно вывести некоторые соотношения, известные из курса физики.

1. *Магнитная сила вокруг бесконечного прямолинейного проводника,* по которому протекает ток *I*. Магнитные линии в этом случае имеют форму концентрических окружностей с центром на оси проводника. Подсчитаем величину

$$\oint H \cos\alpha \, dl$$

для одной из таких окружностей с радиусом *a*. *B* этом случае cosα=l Следовательно, можем написать

$$\oint H \, dl = 4\pi I.$$

Так как в силу симметрии величина *H* будет одна а та же для всех точек денной окружности, то имеем:

$$H \oint dl = 4\pi I$$

или

$$H \cdot 2\pi a = 4\pi I,$$

откуда

H=2I/a

2. *Магнитная сила внутри соленоида.* Пусть кольцевой соленоид, состоит из *n* равномерно навитых витков и сила тока в нем пусть будет *i*. Так как в выражении

$$\oint H \cos\alpha \, dl = 4\pi I$$

мы имеем в виду полное число сцеплений тока с контуром интегрирования, то, беря интеграл по контуру, образуемому осью соленоида, мы должны написать

$$\oint H \cos\alpha dl = 4\pi n i.$$

Так как и в этом случае *H*=const и cosα=1, то

$$H \oint dl = 4\pi n i.$$

или

$$Hl = 4\pi n i.$$

Следовательно,

$$H = \frac{4\pi n i}{l}$$

93

§ 18. Вывод точной формулировки закона магнитной цепи.

Применяя полученное в § 17 соотношение, произведем вывод *точной формулировки закона магнитной цепи.* Выделим в магнитном поле трубку магнитной индукции (рис. 51) столь малого поперечного сечения, чтобы для всех точек любого нормального сечения этой трубки можно было считать величину *H* постоянной.

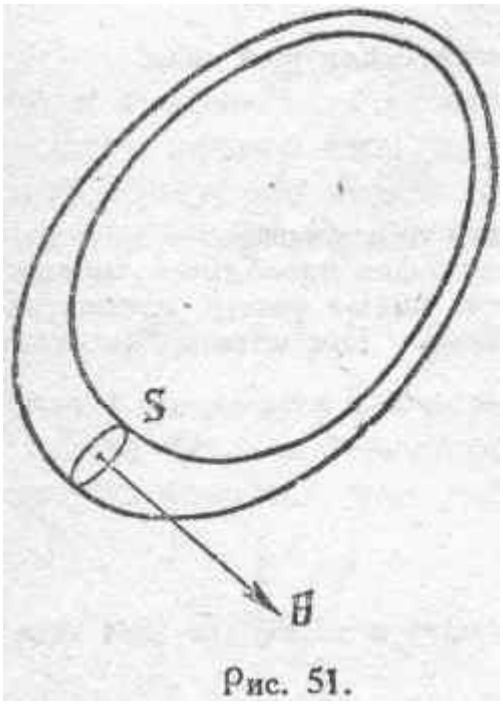


Рис. 51.

Тогда величина потока сквозь любое нормальное сечение элементарной трубки будет равна:

$\varphi=\mu Hs.$

где μ — магнитная проницаемость среды и s — поперечное сечение трубки в данном месте. При этом, по самому определению трубки магнитной индукции, величина φ будет одна и та же для любого ее сечения.

Осевую линию полученной нами таким образом трубки магнитной индукции примем за контур интегрирования, а так как все трубки магнитной индукции суть трубки замкнутые, то мы будем иметь:

$$\oint H\cos\alpha\, dl = 4\pi I.$$

Преобразуем левую часть этого равенства. Так как по условию H перпендикулярно к рассматриваемому сечению трубки в любой ее части, то $\cos\alpha=1$. Далее, из выражения $\varphi=\mu Hs$ получим

$H=\varphi/\mu S.$

Следовательно,

$$\oint H\cos\alpha\, dl = \oint \frac{\varphi}{\mu S} dl = \varphi \oint \frac{dl}{\mu S} = 4\pi I.$$

В этом выражении I—полный ток, сцепляющийся с контуром интегрирования. Если магнитный поток создается обмоткою из n витков, по которой проходит ток силою i, то мы должны написать:

$4\pi I=4\pi ni.$

Следовательно, получаем окончательно):

$$\varphi = \frac{4\pi ni}{\oint \frac{dl}{\mu S}}. \qquad (11)$$

94

Это выражение и дает нам в элементарной (ибо мы взяли элементарную трубку магнитной индукции) и вместе с тем в совершенно точной форме *закон магнитной цепи*. Очевидна совершенная аналогия

этого закона закону Ома: величина, стоящая в числителе (4πni), соответствует ЭДС в законе Ома и называется по аналогии *магнитодвижущей силой (F);* знаменатель $\oint \frac{dl}{\mu s}$ — величина, прямо
пропорциональная длине и обратно пропорциональная магнитной проницаемости и площади поперечного сечения магнитопровода, соответствует электрическому сопротивлению проводника в законе Ома и называется *магнитным сопротивлением* (R_m или просто *R),* Сокращенно пишут:

$$\varphi = F/R. \qquad (12)$$

Так как физически существование „магнитодвижущей силы" в данной магнитной цепи связано с наличием определенного числа витков, несущих ток, то часто измеряют величину магнитодвижущей силы именно числом ампервитков (F'=*ni),* относя коэффициент 4π к знаменателю.
Тогда получаем (если *i* выражено в амперах):

$$\varphi = \frac{F'}{R} = \frac{ni}{\frac{1}{0{,}4\pi}\oint \frac{dl}{\mu s}} = \frac{ni}{0{,}7956 \oint \frac{dl}{\mu s}}.$$

[1]) Здесь i — в абсолютных электромагнитных единицах. Для перехода к амперам надо множить на 10^{-1}.

§ 19. Приближенное выражение закона магнитной цепи.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что соотношение, выражаемое формулами (11) и (12), является совершенно точным, столь же точным, как и аналогичный ему закон Ома. Иногда приходится встречать указания, что совершенно точным является из этих двух законов (для Электрической и для магнитной цепи) только закон Ома, закон же магнитной цепи является якобы лишь приближенным. Это не совсем так. Точность обеих формулировок одного и того же порядка: они применимы без всяких оговорок в случае так называемых линейных проводников, т. е., когда поперечные размеры цепи (магнитной или электрической) ничтожно малы по сравнению с ее длиною или когда цепь можно разбить на ряд параллельных совершенно тождественных линейных проводников.
Если бы мы захотели, взяв в качестве части электрической цепи тело трех измерений (рис. 52), применить закон Ома в его простейшей и элементарной форме к этой части цепи между точками *A* и *B,* мы получили бы неточный результат, потому что отдельные пути тока внутри проводника отличаются друг от друга.

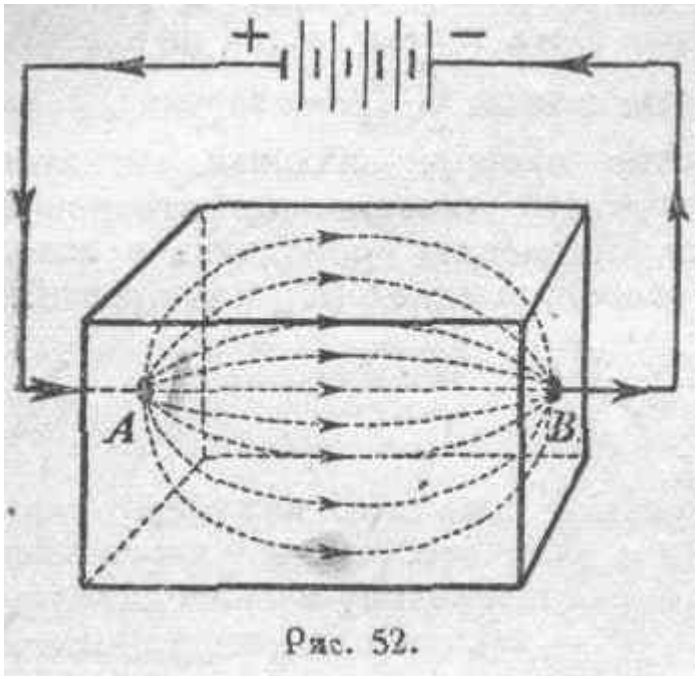


Рис. 52.

Точно так же лишь приближенные результаты дает закон магнитной цепи, если мы применим *его* в полученной нами основной форме для

95

сложного магнитопровода, подобного, например, изображенному на рисунке 53.

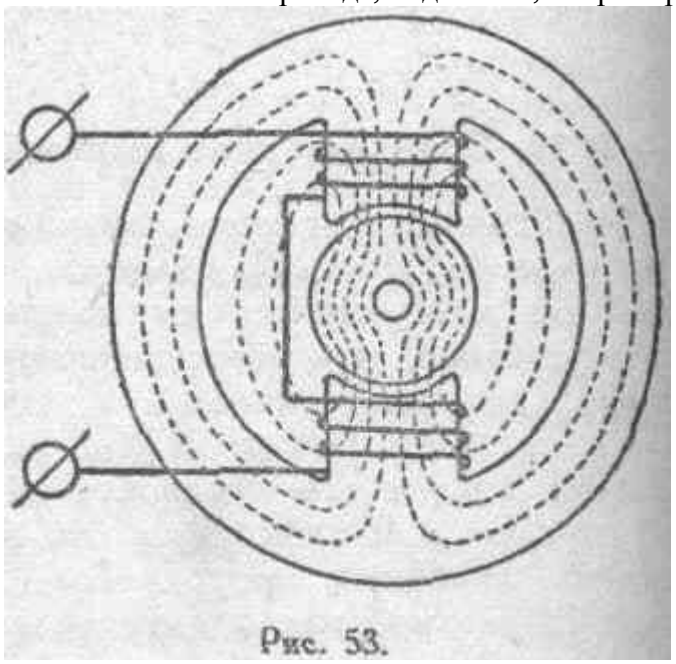


Рис. 53.

В этом случае не все магнитные линии проходят через железо по путям одной и той же длины; некоторые из них, кроме того, замыкаются по кратчайшему пути через воздух. Мы имеем так называемое „магнитное рассеяние". Неодинаковы, кроме того, будут и величины μ и s в различных частях магнитной цепи. Для точного расчета следовало бы в этом случае разбить полный поток Φ на ряд элементарных потоков φ, к каждому из которых применимо полученное нами соотношение (11), и определить величину полного потока Φ, как сумму всех таких элементарных потоков:

$\Phi = \Sigma\varphi$.

Лишь приближенно мы можем считать величины l, μ и s одинаковыми для всех k элементарных потоков и писать

$$\Phi = k\varphi = k\frac{4\pi ni}{\oint \frac{dl}{\mu s}}$$

или, относя коэффициент k к знаменателю и полагая $ks=S$, т. е. полному поперечному сечению магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{4\pi ni}{\oint \frac{dl}{\mu ks}} = \frac{4\pi ni}{\oint \frac{dl}{\mu S}}.$$

Часто упрощают расчет, поступая следящим образом. Разбивают магнитную цепь по длине на отдельные участки, для каждого из которых можно считать с достаточной для практики точностью μ. и s постоянными. Тогда интеграл, выражающий сопротивление магнитной цепи, можно разбить на ряд слагаемых:

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \int \frac{dl_1}{\mu_1 s_1} + \int \frac{dl_2}{\mu_2 s_2} + \dots,$$

где значки 1, 2 и т. д. указывают на соответствующие участки «агнитной цепи. Так как при этом, кроме того, можно считать μ_1=const, s_1=const, μ_2=const, s_2=const и т. д., то последнее равенство можно переписать в виде:

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \dots = \sum \frac{l}{\mu S}.$$

96

Закон магнитной цепи в этом случае можно записать так

$$\Phi = \frac{4\pi ni}{\sum \frac{l}{\mu S}} = \frac{ni'}{0{,}7956 \sum \frac{l}{\mu s}}, \qquad (13)$$

где i выражено в абсолютных электромагнитных единицах, а i' — в амперах.

Именно эта приближенная формулировка обычно применяется при расчете электрических машин. Практически она дает вполне достаточные по точности результаты.

[1]) Всякий проводник является, конечно, телом трех измерений; этим выражением мы подчеркиваем в данном случае лишь значительные по сравнению с длиною поперечные размеры проводника

§ 20. Энергия магнитного потока.

Понятие о присущей магнитному потоку энергии является важным в учении о природе магнитных явлений. В начальный период развития науки о магнитных явлениях совершенно не уделялось внимания той среде, в которой эти явления происходят. Закон Кулона, как известно, оперирует с так называемыми магнитными массами, расположенными на полюсах магнита, массами, фиктивность которых не подлежит для нас теперь никакому сомнению (см. § 31). В соответствии с этим и вопрос об энергии магнитных систем связывался, в построениях первых исследователей с этими магнитными массами так же, как в учении об электрическом поле считалось, что вся энергия системы сосредоточена в зарядах расположенных на поверхности заряженных тел. Работы Фарадея привели нас к убеждению, что энергия магнитной системы распределена по всему пространству, в котором обнаруживается действие магнитных сил. В настоящее время нет никаких сомнений в том, что энергия магнитного поля не сосредоточена в полюсах, но что каждый элемент объема, занятого магнитным потоком, является носителем определенной части энергии. В нижеследующих строках мы дадим некоторые простейшие соотношения, характеризующие магнитный поток с точки зрения обусловливаемого им запаса энергии.

Разберем наиболее интересный для электротехники случай намагниченного вещества. Переход отсюда к энергии магнитного потока в пустоте будет легко сделать, положив μ=1.
Представим себе в качестве магнитопровода, т. е. магнитной цепи, в которой существует поток, железное кольцо с равномерно наложенной на него обмоткой из *n* витков (рис. 54).

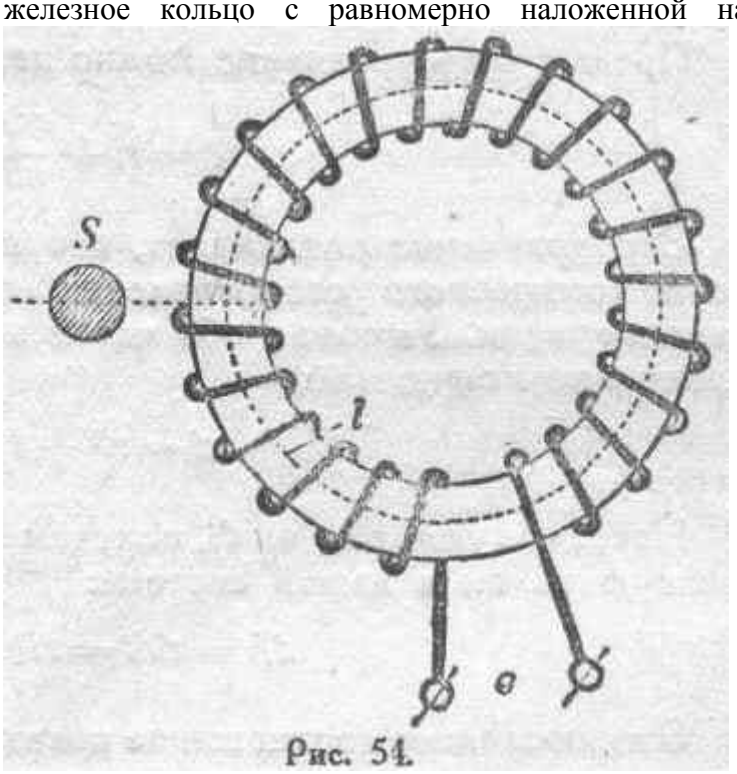


Рис. 54.

Если к такой
97

обмотке приложить некоторую ЭДС, которая возбудит в ней ток, то весь возникающий при этом магнитный поток окончательно сосредоточивается, как известно, внутри такого замкнутого соленоида (тороида), и вне занимаемого им объема магнитное поле можно принять отсутствующим. Поперечное сечение кольца выберем столь малым, чтобы можно было считать поле равномерно распределенным по поперечному сечению тороида.
Чтобы найти интересующую нас величину энергии магнитного поля в единице объема, определим сначала работу, совершаемую источником тока в процессе установления магнитного потока в тороиде. Будем исходить из закона Ома *в наиболее общей*, его
формулировке:

$$i = \frac{e - \frac{d\Phi_s}{dt}}{r},$$

где e — внешняя приложенная ЭДС, Φ_s — поток самоиндукции,
$-d\Phi_s/dt$ есть обратная ЭДС самоиндукции, r— сопротивление обмотки.
Предыдущее уравнение можно переписать так:

$$e = ri + \frac{d\Phi_s}{dt}.$$

Это уравнение показывает, что внешняя ЭДС идет на преодоление омического сопротивления проводника и обратной ЭДС самоиндукции. Умножая обе части этого уравнения на i, получаем уравнение мощностей:

$$ei = ri^2 + i\frac{d\Phi_s}{dt}.$$

Наконец, умножая на *dt*, получим элементарную работу *dA*, совершенную током в нашей системе:
$dA=eidt=ri^2dt+id\Phi_s$.
Это последнее соотношение показывает, что затрачиваемая источником тока работа идет на нагревание обмотки (ri^2dt) и на изменение магнитного состояния среды $(id\Phi_s)$. Нас интересует именно вторая составляющая работы. Обозначая ее dA_m, имеем:
$dA_m=id\Phi_s$. (14)
Величина Φ_s *в* этом выражении представляет собою полный поток самоиндукции, сцепляющийся с данным контуром тока, т. е, полное число сцеплений этого потока с контуром. Так как контур состоит в нашей случае из *n* витков, то под Φ_s надо понимать не тот поток, который реально существует в соленоиде (обозначим последний через $\Phi_0=Bs$, где *B* — магнитная индукция в данной поперечном сечении, площадь которого есть s), а число сцеплений
98

этого реально существующего потока с контуром тока, т. е. величину в *n* раз большую. Таким образом, можем написать:
$\Phi_s=Bsn$.
Подставляя значение Φ_s в равенство (14), получаем:
$dA_m=id\Phi_s=isndB$,
т. е. работа, затрачиваемая на изменение магнитного состояния системы, пропорциональна произведению из силы тока на приращение магнитной индукции.
Исключим из полученного равенства величину *i*, для чего воспользуемся соотношением

$$H = \frac{4\pi nl}{l}$$

(см. примечание на стр. 93). Отсюда

$$i = \frac{Hl}{4\pi n}.$$

Подставляя вместо *i* полученное выражение, имеем:

$$dA_m = \frac{ls}{4\pi} HdB.$$

Отметим, что в полученное выражение не входит время. Следовательно, работа, затрачиваемая внешней ЭДС на создание магнитного потока, не зависит or времени его установления. Этот результат интересно сопоставить с затратой работы на джоулево тепло, пропорциональной времени.
Разделив полученное выражение на объем кольца, т. е. на *sl*, получим работу, затрачиваемую на элементарное изменение магнитного состояния вещества в единице объема:

$$dA_1 = \frac{1}{4\pi} HdB. \qquad (15)$$

Конечная работа, затрачиваемая на установление в единице объема намагничиваемого вещества магнитного поля, характеризуемого величинами *H* и *B*, будет равна:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^B HdB. \qquad (16)$$

Сложность зависимости между *B* и Я делает вычисление полученного интеграла в общем случае крайне трудным. В некоторых случаях величину A_1 оказывается возможным найти графически, о чем мы еще будем говорить дальше (см. § 35). Пока же остановимся на частном случае, когда
$\mu=B/H=const$.

99

Тогда можем написать:

$$A_1 = \frac{\mu}{4\pi}\int_0^H HdH = \frac{\mu H^2}{8\pi}. \qquad (17)$$

Это выражение можно написать еще в следующих двух формах:

$$A_1 = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu}.$$

Ясно, конечно, что соотношение (17) дает нам именно величину запаса энергии в единице объема, занятого магнитным потоком,— энергии, обусловленной наличием этого потока.

Для пустоты (то же приближенно справедливо и для воздуха) $\mu=\mu_0=1$ и потому A_1 численно равно: $H^2/8\pi$.

§ 21. Энергия магнитной линии (единичной трубки магнитной индукции).

В начале настоящего курса говорилось, что мы мыслим магнитный поток состоящим из магнитных линий, т. е. из ряда элементарных (единичных) трубок магнитной индукции. Отсюда следует, что н полную энергию в объеме, занятом магнитным потокам (при условии μ=const):

$$A = \int_v \frac{\mu H^2}{8\pi} dv,$$

можно представить распределенной между отдельными магнитными линиями, т. е. единичными трубками. Подсчитаем энергию, приходящуюся на долю единичной трубки магнитной индукции, т. е. трубки, для которой

$\Phi_1 = \mu Hs = 1$,

иначе говоря, энергию одной магнитной линии.

Элемент объема трубки $dv=sdl$ содержит магнитную энергию:

$$\frac{\mu H^2}{8\pi} dv = \frac{\mu H^2}{8\pi} sdl.$$

Следовательно, во всей трубке заключается энергия:

$$A' = \oint \frac{\mu H^2}{8\pi} sdl = \oint \frac{\mu Hs}{8\pi} Hdl.$$

Так как $\mu Hs=1$, то

$$A' = \frac{1}{8\pi}\oint Hdl,$$

100

что, по § 17, приводит к чрезвычайно простому соотношению:

$$A' = \frac{1}{8\pi}\cdot 4\pi I = \frac{1}{2} I. \qquad (18)$$

Итак, энергия, отнесенная к единице магнитного потока (одной магнитной линия), выражается половиною силы тока, сцепляющегося с данным магнитным потоком.

Таким образом, например, при I=10 ампер энергия единичной трубки (одной магнитной линии):

$$A' = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-1} = 0{,}5 \text{ эрга}$$

и т. д.

Подсчитаем, пользуясь только-что выведенным соотношением, энергию потока самоиндукции, связанного с некоторым током *i*. Величина этого потока, как известно, равна:

$\Phi_s = Li$,

где *L*—коэффициент самоиндукция, представляющий собою полное число сцеплений реально существующего потока самоиндукции с данным контуром тока, сила которого при этом принимается равной единице (см. § 99).

Рассмотрим самый общий случай, когда мы имеем сколь угодно сложный контур тока. Допустим, что в случае, когда, сила тока в контуре равна единице, k_1 магнитных линий реально существующего потока сцепляются с n_1 витками; k_2 магнитных линий сцепляются с n_2 витками; k_3 магнитных линий сцепляются с n_3 витками и т. д. Если же сила тока равна *i*, то пропорционально силе тока изменяется и поток самоиндукции, т. е. при этом:

$k_1 i$ магнитных линий сцепляется с током $n_1 i$,
$k_2 i$ » » » » » $n_2 i$,
$k_3 i$ » » » » » $n_3 i$.
и т. д.

Принимая во внимание данное выше соотношение (18) для энергии, отнесенной к одной магнитной линии, получаем:

$k_1 i$ магн. линий обладают запасом энергии, равным $\frac{1}{2} k_1 n_1 i^2$,
$k_2 i$ » » » » » $\frac{1}{2} k_2 n_2 i^2$,
$k_3 i$ » » » » » $\frac{1}{2} k_3 n_3 i^2$
и т. д.

А все магнитные линии потока самоиндукции являются носителями запаса анергии:

$$A_s = \frac{1}{2}\left(k_1 n_1 + k_2 n_2 + k_3 n_3 + \ldots\right) i^2.$$

Согласно определению, имеем:

$$k_1 n_1 + k_2 n_2 + k_3 n_3 + \ldots = L.$$

Следовательно, окончательно получаем:

$A_s = {}^1/_2 Li^2$.

Обратим внимание на сходство этого выражения с выражением кинетической энергии механической системы: ${}^1/_2 mv^2$; смысл этой аналогии мы уясним в дальнейших частях курса (см. § 28 и главу VII).

На основании всего предыдущего ясно, что, распространяя интегрирование на весь объем, занятый потоком самоиндукции, мы можем написать:

$$\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{8\pi} \int_v \mu H^2 dv.$$

§ 22. Тяжение магнитных линий.

При дальнейшем изучении свойств магнитного потока мы остановимся на явлении *тяжения магнитных линий.* Совершенно естественно представлять себе все явления, происходящие в магнитном поле, как следствие особых свойств магнитного потока в целом и составляющих его единичных трубок магнитной индукции в частности. Фарадей, создавший представление о магнитном поле как о совокупности физически существующих магнитных линий, рассматривал все явления, происходящие в магнитном поле, именно как результат проявления свойств этих элементов магнитного потока. По Фарадею, магнитные линии ведут себя как упругие нити, стремящиеся сократиться. Это проявляется, например, в обнаруживаемом магнитными линиями стремлении сблизить элементы магнитной цепи. Вообще, во всех случаях, когда в результате существования магнитного поля возникают механические силы, их можно отнести за счет стремления магнитных линий к сокращению.

Максвелл, подвергший тщательному математическому обследованию все свойства магнитного потока, показал путем анализа и в полном согласии с воззрениями Фарадея, что в магнитном поле должны возникать механические напряжения, которые должны производить соответствующие механические же воздействия на все материальные тела, внесенные в поле. Для случая неоднородной анизотропной среды выражение для этих сил получает сложный вид. Мы ограничимся рассмотрением простейшего случая однородной изотропной среды.

Представим себе (рис. 55) два разноименных полюса и нарисуем картину распределения магнитных линий в этом случае.

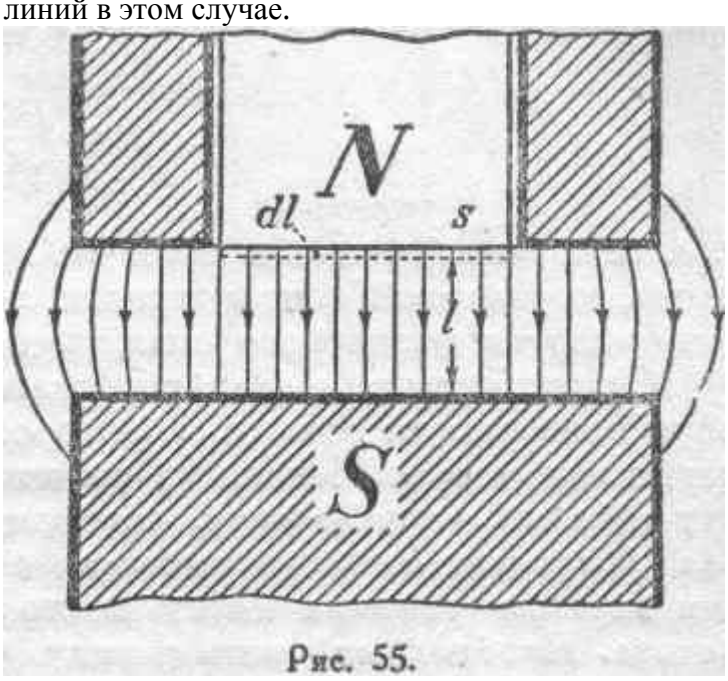


Рис. 55.

Если щель между полюсами достаточно узка, то в центральной части ее поле можно считать однородным. По бокам же однородность поля нару-

шается. Для того, чтобы это обстоятельство не затрудняло рассмотрения вопроса, вырежем среднюю цилиндрическую часть северного полюса, получив таким образом вокруг нее „охранное кольцо", которое даст нам возможность в наших расчетах принимать во внимание лишь среднюю часть пространства между полюсами, где поле является однородным. Вырезанная часть представится в виде цилиндра с поперечным сечением s.

В силу своей упругости, магнитные линии будут стягивать полюсы, и вырезанный элемент магнита будет находиться под действием сил тяжения. Постараемся определить величину силы тяжения,

действующей на площадь s. Расчет будем вести, исходя из выражения для энергии магнитного потока и принципа сохранения энергии.

Обозначим через *f'* силу тяжения, действующую на единицу поверхности, а через *f* — силу, действующую на всю площадку s. Тогда

$f=f's$.

Для расчета предположим, что центральная цилиндрическая часть под действием сил тяжения несколько сместилась, причем величину этого элементарно малого смещения обозначим через *dl* (положение сместившегося цилиндра показано на рис. 55 пунктиром). Такое смещение вызовет соответствующее изменение количества энергии, запасенной в магнитном поле, так как работа перемещения за отсутствием других источников энергии может быть произведена лишь за счет энергии магнитного потока. Действительно, объем поля в пространстве между магнитами стал меньше, и количество энергии, запасенной в поле, должно соответственно уменьшиться. Полный интересующий нас объем, занимаемый полем между магнитами, выражается произведением *ls*, где *l* есть расстояние между полюсами. Считая запас энергии на единицу объема равным (17)

$$A_1 = \frac{\mu H^2}{8\pi}$$

и пренебрегая бесконечно малыми высших порядков, получим, что, при перемещении цилиндра на элемент *dl*, в механическую работу превратится часть энергии магнитного поля, равная

$$\frac{\mu H^2}{8\pi} sdl.$$

С другой стороны, эта же работа равна

$$fdl = f'sdl.$$

Следовательно, на основании закона сохранения энергии, можем написать:

$$f'sdl = \frac{\mu H^2}{8\pi} sdl$$

или, сокращая на *sdl*, получаем в динах на кв. сантиметр:

$$f' = \frac{\mu H^2}{8\pi}, \qquad (19)$$

т. е. сила тяжения магнитных линий, рассчитанная на единицу поверхности, нормальной к поверхности потока, численно равна количеству энергии магнитного поля, рассчитанному на единицу объема.

Мы рассчитывали величину силы тяжения, действующей на единицу поверхности полюса, к которому, так сказать, „присосались" магнитные линии. Исходя из положения, что магнитные линии ведут себя как упругие нити, естественно заключить — как это сделал Фарадей и математически обосновал Максвелл,—что такая же сила тяжения имеет место в любом поперечном сечении потока. Необходимо иметь в виду, что полученное выражение (19) пригодно лишь для однородной и изотропной среды, и μ=const. При несоблюдении этих условий характер явления в основном остается тем же, но математическая формулировка соответствующих зависимостей значительно усложняется.

Пользуясь равенством μH=*B*, мы можем преобразовать полученное выражение следующим образом:

$$f = \frac{\mu H^2}{8\pi} = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu}.$$ *

Обычно мы наблюдаем механические проявления магнитного поля в воздухе, т.е. при μ=1. В этом случае *f'* численно равно:

$$\frac{H^2}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi}$$ [1]).

[1]) ***В этой и предыдущих формулах может обратить на себя внимание парадоксальный, на первый взгляд, факт, именно, что выражения для силы и для энергии как бы совпадают между собой. Кажущаяся парадоксальность исчезнет, если мы вспомним, что в формулах (19) и (17) фигурируют сила, рассчитанная на единицу поверхности, и энергия, рассчитанная на единицу объема. Не трудно убедиться, что при этих условиях размерности той и другой величины совпадают:***

$$\frac{\text{энергия}}{\text{объем}} = \frac{A}{v} = \frac{A}{sl} = \frac{\text{сила} \times \text{путь}}{sl} = \frac{fl}{sl} = \frac{f}{s} = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}}.$$

[1]) ***Подобное „охранное кольцо" мы имеем в абсолютном влектрометре В. Томсона (лорда Кельвина).***

[1]) ***Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. II, §§641—645.***

§ 23. Подъемная сила магнита.

Разберем несколько примеров, где полученные нами формулы находят себе практическое применение.

Рассчитаем в виде первого примера подъемную силу электромагнита. Имеем магнитный полюс *N* (рис. 56), притягивающий некоторую железную массу.

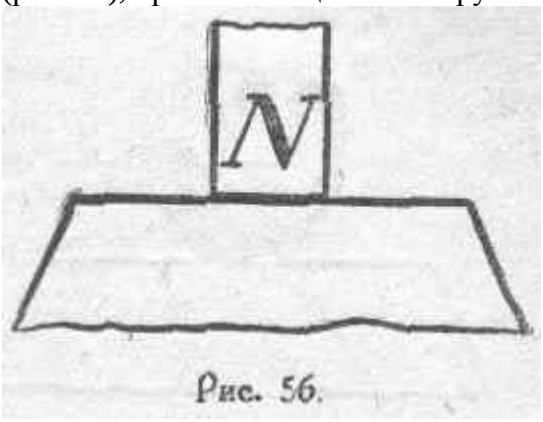


Рис. 56.

Так как щель между магнитом и притягиваемым им грузом достаточно узка, то практически можно, *пренебрегая утечками,* считать поле внутри нее однородным, т. е. предполагать, что магнитные линии параллельны друг другу и перпендикулярны к поверхности полюса магнита. В таком случае подъемную силу магнита мы можем рассчитать по формуле:

$$f = f's = \frac{B_0^2}{8\pi}s, \qquad (20)$$

где B_0 обозначает магнитную индукцию в шели, т. е. в воздухе. Мы вводим в формулу величину индукции в воздухе B_0 потому, что притяжение осуществляется именно магнитными линиями, расположенными в щели между магнитом и грузом, т. е. в воздухе. Но удобнее представить формулу (20) в несколько другом виде, введя, вместо величины индукции в воздухе B_0, величину индукции в магните, которую мы обозначим через B_m. Не трудно убедиться, что в данном случае

$B_0 = B_m$.

В самом деле, все магнитные линии, выходящие из тела магнита в силу своей непрерывности, должны пройти через междужелезное пространство, а так как в этом междужелезном пространстве они перпендикулярны к поверхности магнита, что число их, приходящееся на единицу поверхности, в железе и в воздухе будет одинаково, т. е.

$B_0=B_m$.

Таким образом, формула (20) приобретает вид:

$$f=\frac{B_m^2}{8\pi}s. \qquad (21)$$

Это соотношение можно преобразовать, воспользовавшись равенством: $\Phi=Bs$, где Φ есть полный магнитный поток. Тогда получаем:

$$f=\frac{\Phi^2}{8\pi s}. \qquad (22)$$

Из полученных выражений (21) и (22) для подъемной силы магнита мы можем сделать заключение, что при постоянной величине магнитной индукции в полюсных частях магнита сила притя-

жения прямо пропорциональна площади поверхности соприкосновения магнита с притягиваемым грузом. В случае же постоянства магнитного потока подъемная сила обратно пропорциональна этой площади, и в таких случаях может оказаться выгодным применение железного башмака, указанного на рисунке 57, уменьшающего площадь соприкосновения.

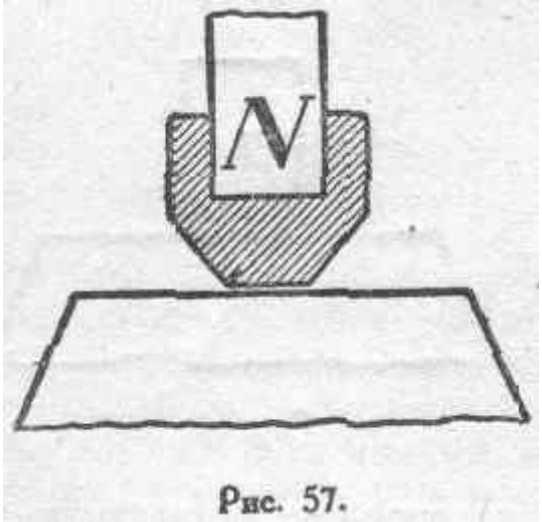


Рис. 57.

Башмак концентрирует магнитные линии, и магнитный поток лучше используется. При этом, однако, нужно иметь в виду, что нельзя итти сколь угодно далеко в направлении уменьшения поверхности соприкосновения. Действительно, при постоянном потоке такое уменьшение поверхности соприкосновения ведет к увеличению магнитной индукции $B=\mu H$, причем μ сильно падает, и за счет рабочего потока возрастает поток рассеяния.

§ 24. Отрывной пермеаметр.

Выведенные соотношения находят, между прочим, применение в теории отрывных пермеаметров, т. е. приборов, служащих для исследования магнитных свойств железа, Исследование сводится к построению кривой $B=f(H)$ и, отсюда, кривой $\mu=f(B)$. Таким образом, задача состоит в нахождении величины индукции в железе при каждом данном значении H.

Один из приборов этого рода изображен схематически на рисунке 58.

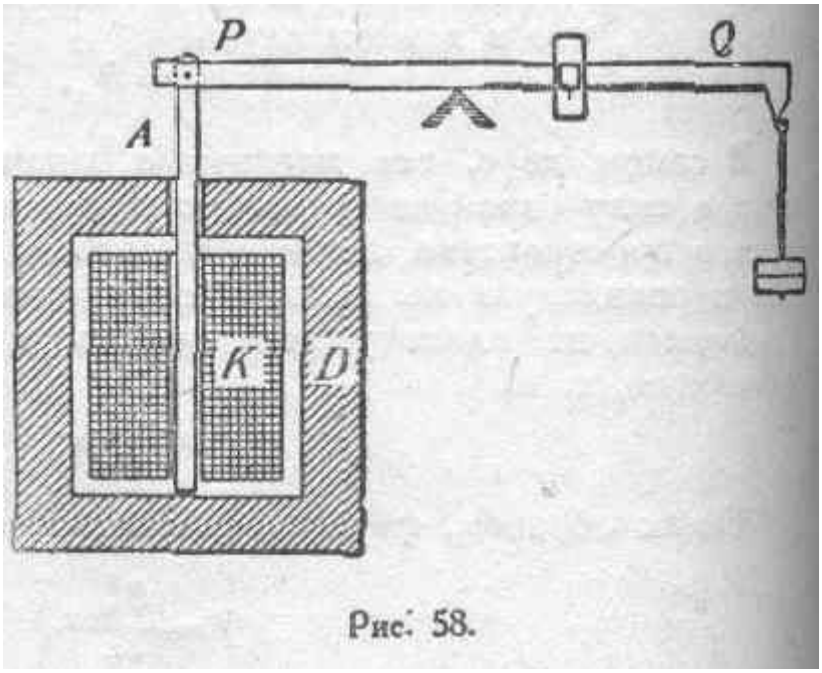


Рис. 58.

Испытуемый образец железа *A* помещается внутри катушки *K* из *n* витков изолированной проволоки, несущих ток *i*. Ярмо *D* служит для замыкания магнитной цепи. Для нахождения интересующей нас величины магнитной индукции в железе *B* мы определяем при помощи рычага *PQ* величину усилия, необходимого для отрывания испытуемого образца от ярма. Свяжем величину этого механического усилия с величиной *B*. На основании рассуждения, аналогичного приведенному выше (§ 23), можно принять, что индукция в щели стыка будет равна индукции в железе. Следовательно, через щель проходит поток:

$\Phi_0 = Bs,$

где s—сечение образца. Однако, при отрывании образца нам приходится преодолевать тяжение не всех магнитных линий, а только некоторой части их, равной

$$\Phi = Bs - \mu_0 Hs = (B - \mu_0 H)\, s,$$

так как часть потока, создаваемая неподвижной катушкой в пространстве, как в таковом, и равная $\mu_0 Hs$, является основной и не претерпевает никакого растяжения при отрывании образца от ярма. Поток $\mu_0 Hs$ является основным в том смысле, что он связан только с катушкой *K* совершенно независимо от наличия образца *A*. Магнитный же поток, добавляемый испытуемым железным стержнем, т. е. та часть потока, тяжение которой мы преодолеваем, отрывая стержень, равна разности между результирующим потоком *Bs* и основной его частью, т. е. $\mu_0 HS$.

Приближенно рассчитывая силу этого тяжения, имеем:

$$f = \frac{\Phi^2}{8\pi s} = \frac{(B - \mu_0 H)^2 s^2}{8\pi s} = \frac{(B - \mu_0 H)^2 s}{8\pi}.$$

Отсюда находим:

$$B = \sqrt{\frac{8\pi f}{s}} + \mu_0 H.$$

H— сила магнитного поля, создаваемого катушкой *K*, определяется по формуле:

$$H = \frac{0{,}4\pi ni}{l},$$

где *i* — сила тока в амперах, *l*— длина катушки.

Беря разные значения *i* и определяя каждый раз величину *f*, получаем кривую *B=f(H).*

§ 25. Природа электромагнитной силы.

Объяснение механических действий магнитного поля тяжением магнитных линий предоставляет возможность дать весьма простое физическое толкование причин возникновения электромагнитной силы, т. е. силы механического взаимодействия проводника, несущего ток, с магнитным полем. Представим себе поле между двумя полюсами магнита и помешенный в это поле перпендикулярно к нему проводник, по которому течет ток. Мы знаем, что при прохождении по проводнику тока вокруг него возникает магнитное поле в виде кольцевых магнитных линий. Направление этого поля тока легко определяется по правилу штопора. Картина результирующего магнитного поля может быть получена аналитически или путем использования железных опилок и построения магнитного спектра. Не трудно будет убедиться, что по одну сторону проводника, как бы в силу наложения противоположных магнитных состояний среды, магнитное поле ослабится, в то время, как по другую сторону проводника, наоборот, магнитные линии располо-

жатся более густо. Поле тока, таким образом, исказит основное магнитное поле. В результате получится картина, данная на рисунке 59 (см. также рис. 26— 28).

Если достаточно освоиться с фарадеевским представлением о магнитном поле, как о системе реально существующих упругих нитей, стремящихся стянуться, то, не прибегая к правилу левой руки, по одному взгляду на рисунок 59 можно сказать, что проводник будет испытывать со стороны поля давление, стремящееся сдвинуть его влево.

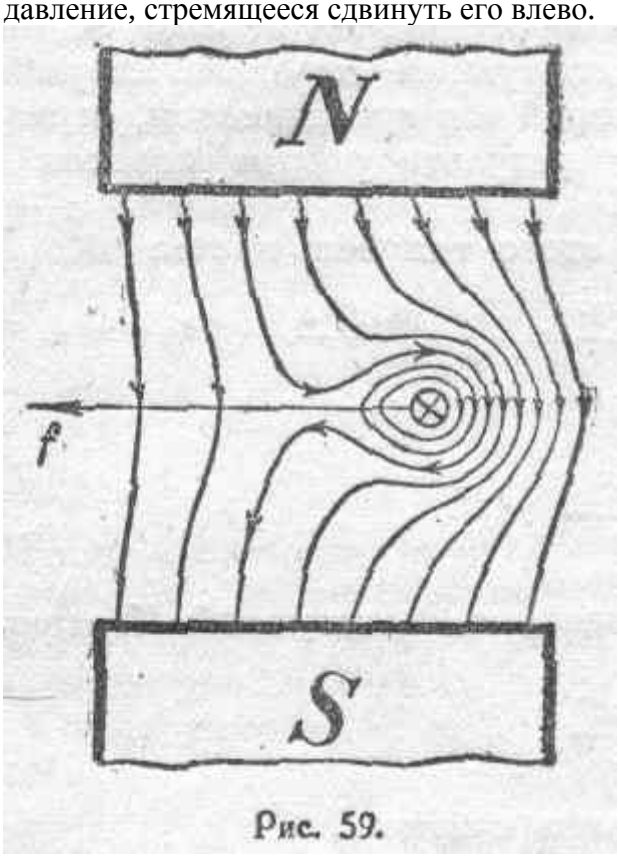


Рис. 59.

Вообще, правильное представление о вероятном

механизме явлений, имеющих место в магнитном поле, делает запоминание разного рода мнемонических правил излишним.

Картину магнитного поля в каждом данном случае можно, как указано выше, получить аналитически путем расчета или же, что гораздо проще, при помощи магнитных спектров. Эти спектры известны еще со времени Гильберта (XVI век), но только Фарадей научил нас (см. § 1) видеть в них определенный физический смысл, а именно схему какого то реально происходящего физического процесса. В этом—громадная заслуга Фарадея.

Совершенно аналогичным образом можно трактовать и механические процессы, происходящие в более сложных случаях. Рассмотрим, например, схему магнитного потока в двигателе постоянного тока (рис. 60).

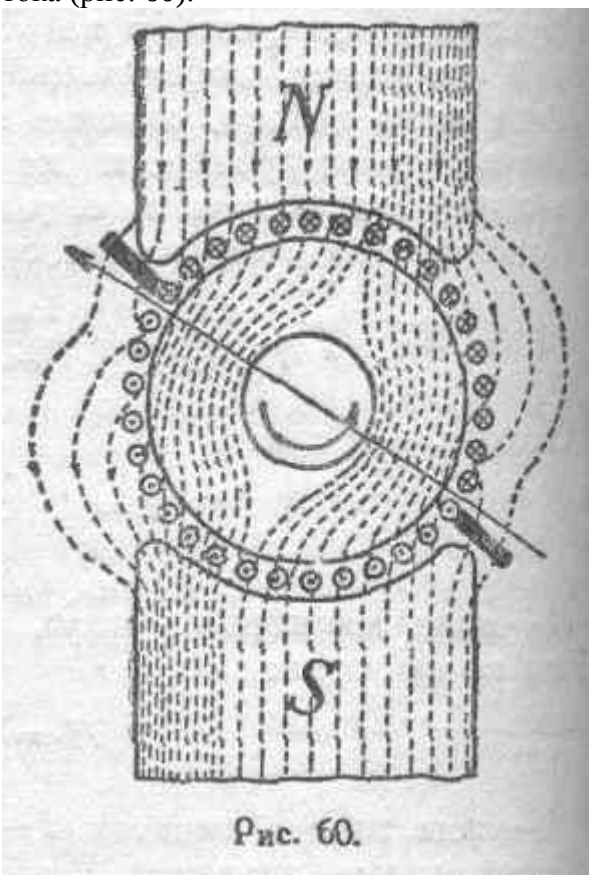


Рис. 60.

При прохождении тока по обмотке двигателя этой обмоткой, как таковой, создается поле, направление которого показано на рисунке прямой стрелкой. Взаимодействуя с основным

полем, поле якоря создает некоторое результирующее поле, скошенное под северным полюсом в одну сторону, под южным — в другую, как показано на рисунке 60. Деформированные таким образом магнитные линии, стягиваясь, естественно создадут пару сил, стремящуюся вращать якорь (против часовой стрелки в данном случае). Если бы не было коммутации, т. е. если бы направление тока в каждом данном проводнике не менялось при прохождении под щеткой, то якорь, повернувшись на такой угол, при котором несимметрия магнитного поля исчезает, остановился бы. Таким образом, коммутация необходима для того, чтобы искусственно поддерживать несимметрию магнитного поля.

Этот пример выясняет нам, каким путем происходит преобразование электрической энергии в механическую. Подводимая к двигателю электрическая энергия идет на деформирование магнитного поля. Это деформированное состояние поля и является непосредственной причиной возникновения вращающего момента (см. § 12). Обратное явление происходит в генераторе. Механическая энергия двигателя, вращающего генератор, расходуется на преодоление тяжения деформируемых

проводниками якоря магнитных линий основного магнитного поля машины. Путем процесса, подробное рассмотрение которого будет дано в глазе V, „Природа электрического тока", и элементарной схемой которого является пример, приведенный нами на рисунках 26 — 28 (почкование магнитных линий), энергия деформированных магнитных линий распределяется по всей замкнутой цепи тока, состоящей из проводников арматуры и внешней части цепи. Таким образом, магнитный поток является физически необходимым посредником при преобразовании механической энергии в электрическую и обратно.

[1]) В том, что поле, создаваемое якорем, будет иметь именно такое направление, не трудно убедиться, рассмотрев распределение токов по проводникам обмотки. Ясно, что мы можем рассматривать якорь как электромагнит, отличающийся от обычного электромагнита лишь тем, что в якоре витки намагничивающей обмотки по краям его (у щеток) имеют меньшие размеры, чем посредине.

§ 26. Боковой распор магнитных линий.

Чтобы покончить с вопросом о механических свойствах магнитного потока, остановимся еще на одном явлении, сопутствующем тяжению магнитных линий. Из рисунка 59 ясно, что если придерживаться представления о магнитных линиях как об упругих нитях, то, кроме сил тяжения, должно еще иметь место боковое давление одних линий на другие. Можно говорить, что эти поперечные силы в сумме и дают усилие, выталкивающее проводник из поля. Мы можем и должны, однако, рассматривать это боковое давление, так называемый боковой распор магнитных линий, не как что-то самостоятельное, а лишь как другую сторону тех самых механических напряжений, которые резче всего выявляются в рассмотренном выше свойстве продольного тяжения.

К представлению о существовании бокового распора магнитных линий можно подойти еще и с другой стороны. Мы знаем, что в среде однородной и изотропией тяжение магнитных линий, рассчитанное на 1 $см^2$, выражается соотношением

$f = BH/8\pi$.

Тяжение, рассчитанное на одну магнитную линию, выразится соотношением:

$$f = \frac{f'}{B} = \frac{H}{8\pi},$$

так как B есть число магнитных линий, приходящихся на 1 $см^2$ Из полученного равенства следует, что в неоднородном магнитном поле, т. е. в поле, для которого $H \neq const$, тяжение магнитных линий меняется вдоль их длины.

Выделим в неоднородном поле участок трубки индукции указанной на рисунке 61 формы.

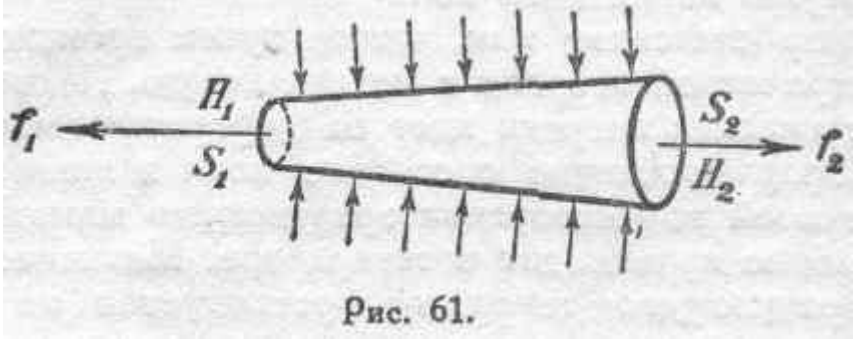


Рис. 61.

Если s_1 и s_2 — два нормальных сечения этой трубки, причем $s_1 < s_2$, то, очевидно, $H_1 > H_2$, а следовательно

$f_1 > f_2$.

Стало быть, рассматривая данный участок трубки с точки зрения механического равновесия, мм должны предположить существование еще каких-то дополнительных сил. По Максвеллу, на силы продольного тяжения накладываются силы, по природе своей аналогичные гидростатическому давлению, т. е. нормальные, к стенкам трубки (рис. 61). В общем случае выражение для этих сил бокового распора имеет сложный вид. Для случая среды однородной и изотропной, при $\mu=\text{const}$, согласно Максвеллу, для силы бокового давления, рассчитанной на 1 $см^2$, получается весьма простое выражение, а именно

$$f'' = \frac{\mu_0 H^2}{8\pi}.$$

Сопоставляя это выражение с найденной выше (§ 22) величиной продольного тяжения магнитных линий (19)

$$f' = \frac{\mu H^2}{8\pi},$$

видим, что в случае среды, для которой $\mu=\mu_0=1$, имеет место равенство

$f''=f'$,

т.е. боковое давление численно равно продольному тяжению. Но такое равенство имеет место *только* при $\mu=\mu_0=1$. Во всех остальных случаях

$f'' \neq f'$.

Следует иметь в виду, что явление бокового распора имеет место всегда, а не только в случае искаженного магнитного поля, В том случае, когда магнитное поле однородно в своей большей части, например, между сближенными полюсами постоянных магнитов, магнитные линии, расположенные по краям занимаемого потоком пространства, изогнуты наружу (рис. 62).

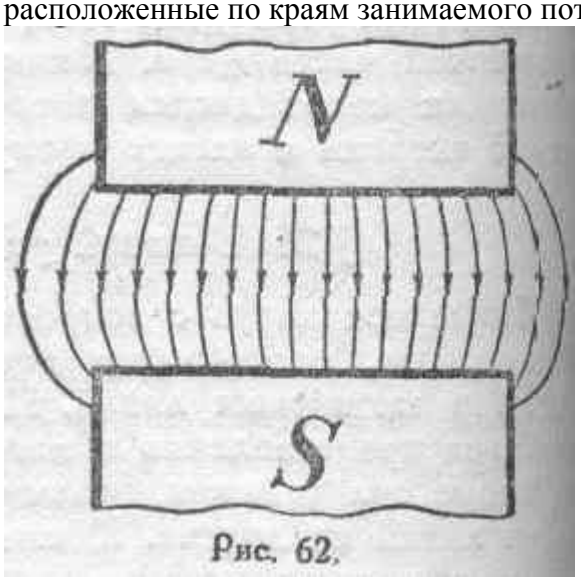


Рис. 62.

Это явление следует приписать именно боковому распору магнитных линий *во всем объеме,* занятом магнитным потоком.

§ 27. Преломление магнитных линий.

Остановимся теперь на явлениях, имеющих место при переходе магнитного потока из одной среды в другую, обладающую иными магнитными свойствами ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Когда магнитный поток нормален к поверхности раздела, мы не встречаем никаких усложняющих обстоятельств: магнитный поток, переходя из одной среды в другую, не претерпевает никаких изменений в отношении своего направления. Если же магнитные линии встречают поверхность раздела

двух средин под некоторым углом, отличающимся от прямого, то мы наблюдаем изменение направления магнитных линий,—явление, которое, по аналогии с явлением преломления света, называют преломлением магнитных линий.

Представим себе (рис. 63) две однородные и изотропные среды I и II, обладающие *магнитными* проницаемостями μ_1 и μ_2.

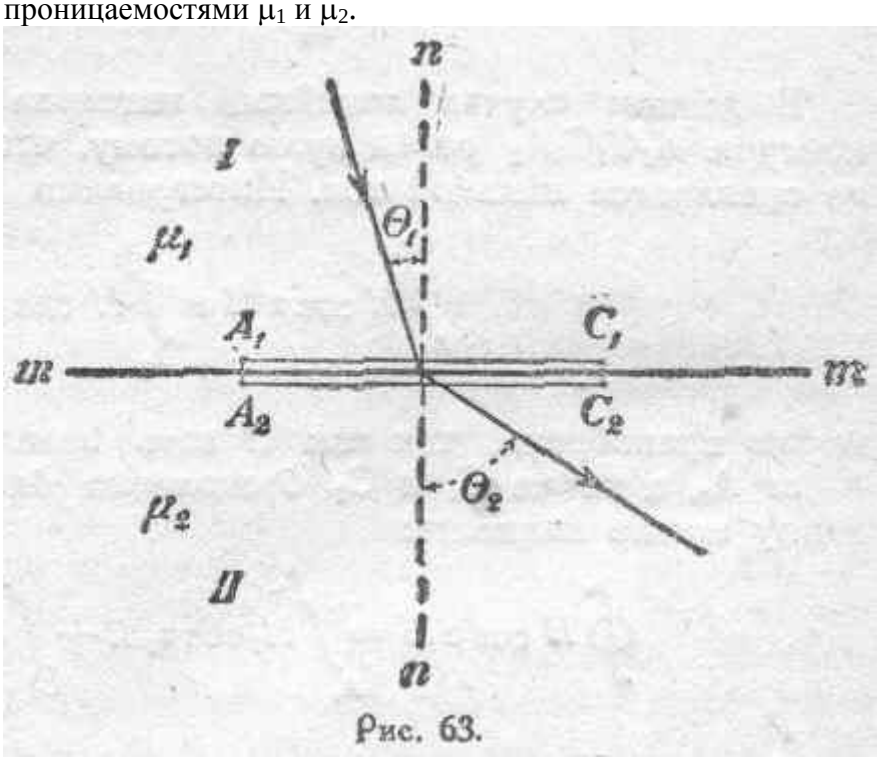


Рис. 63.

Рассмотрим, чтобы не осложнять чертежа, одну магнитную линию, образующую в первой среде угол θ_1 с нормалью *nn к* поверхности раздела *mm*. Угол θ_1 будем называть углом падения. Пусть в среде второй эта магнитная линия составляет с нормалью угол θ_2. о величине которого мы пока ничего не знаем. Угол θ_2 будем называть углом преломления. Условимся, кроме того, что поле в обеих срединах однородно.

Нас интересует соотношение, характеризующее зависимость углов падения и преломления (θ_1 и θ_2) от магнитных свойств обеих

111

средин. В случае, если магнитные проницаемости среды I и II одинаковы, никакого преломления не должно быть, так как в этом случае по отношению к магнитному потоку мы имеем в полном смысле слова одну и ту же среду. Преломление магнитных линий является результатом именно различия магнитных свойств средин. Чтобы уяснить себе происходящее явление, надо рассмотреть магнитные условия на поверхности раздела. Обозначим величину магнитной силы в первой среде через H_1, а величину магнитной индукции через B_1. Для второй среды будем иметь соответственно H_2 и B_2. Возьмем в среде I точки A_1 и C_1, бесконечно близкие к поверхности раздела, и соответственно точки A_2 и C_2 в среде II, бесконечно близкие к точкам A_1 и C_1 и одинаково от них отстоящие. Составляя линейный интеграл магнитной силы вдоль замкнутого контура $A_1C_1C_2A_2$ имеем:

$$\oint H\cos\alpha\,dl=\int_{A_1}^{C_1}H\cos\alpha\,dl+\int_{C_1}^{C_2}H\cos\alpha\,dl+\int_{C_2}^{A_2}H\cos\alpha\,dl+$$
$$+\int_{A_2}^{A_1}H\cos\alpha\,dl=0.$$

В данном случае линейный интеграл магнитной силы вдоль контура $A_1C_1C_2A_2$ равен нулю потому, что с указанным контуром не сцепляется никакой ток. Интегралами

$$\int_{C_1}^{C_2}H\cos\alpha\,dl \text{ и } \int_{A_2}^{A_1}H\cos\alpha\,dl$$

можно пренебречь, так как H есть величина конечная, точки же A_1 и A_2, а также C_1 и C_2 бесконечно близки друг к другу. Поэтому можно написать:

$$\oint H\cos\alpha\,dl=\int_{A_1}^{C_1}H_1\cos\alpha_1\,dl+\int_{C_2}^{A_2}H_2\cos\alpha_2\,dl=0.$$

На основании условия относительно однородности поля величину $H_1\cos\alpha_1$ на протяжении участка A_1C_1 можно считать постоянной и вынести за знак интеграла, а так как

$$\theta_1=90^\circ-\alpha_1$$

и потому

$$\cos\alpha_1=\sin\theta_1,$$

то

$$\int_{A_1}^{C_1}H_1\cos\alpha_1\,dl=H_1\sin\theta_1\int_{A_1}^{C_1}dl.$$

Совершенно аналогично для участка C_2A_2 можем считать:

$$H_2\cos\alpha_2=\text{const.}$$

Но так как интегрирование во втором случае производится в направлении от C_2 к A_2, то:

$$\alpha_2=\theta_2+90^\circ$$

и, следовательно,

$$\cos\alpha_2=-\sin\theta_2,$$

т. е.

$$\int_{C_2}^{A_2}H_2\cos\alpha_2\,dl=-H_2\sin\theta_2\int_{C_2}^{A_2}dl.$$

В результате получаем:

$$H_1 \sin \theta_1 \int_{A_1}^{C_1} dl - H_2 \sin \theta_2 \int_{C_2}^{A_2} dl = 0$$

или

$$H_1 \sin \theta_1 \quad \overline{A_1 C_1} - H_2 \sin \theta_2 \quad \overline{C_2 A_2} = 0$$

н, наконец, так как по условию

$$\overline{A_1 C_1} = \overline{C_2 A_2},$$

получаем

$$H_1 \sin \theta_1 = H_2 \sin \theta_2, \qquad (23)$$

т. е. тангенциальные по отношению к поверхности раздела составляющие силы магнитного поля в обеих срединах одинаковы.

Найдем теперь соотношение, характеризующее величины магнитных индукций B_1 и B_2 у поверхности раздела, для чего воспользуемся принципом непрерывности магнитного потока. Рассмотрим магнитный поток сквозь замкнутую цилиндрическую поверхность, проекции оснований которой изображаются на рис. 63 линиями A_1C_1 и A_2C_2. Обозначим площади этих оснований бесконечно близких, но расположенных в разных срединах, соответственно через s_1 и s_2. Рассматриваемый магнитный поток выражается

интегралом $\int B\cos\beta ds$, который, как известно, равен нулю. Разобьем этот интеграл на три интеграла, взяв один по верхнему основанию s_1, второй—по нижнему s_2, а третий—по цилиндрической поверхности, следами которой на рис. 63 являются отрезки A_1A_2 и C_1C_2. Последним интегралом можно пренебречь, так как основания s_1 и s_2 бесконечно близки, и, следовательно, цилиндрическая поверхность бесконечно мала, а магнитная индукция для всех точек этой поверхности имеет конечное значение. Тогда имеем:

$$\int_s B \cos \beta \, ds = \int_{s_1} B_1 \cos \beta_1 ds_1 + \int_{s_2} B_2 \cos \beta_2 ds_2 = 0.$$

Так как β есть угол между направлением вектора магнитной индукции и внешней нормалью к рассматриваемой поверхности, то в данном случав

$\beta_1=180-\theta_1$ и

$\beta_2=\theta_2$.

Следовательно,

$\cos\beta_1=-\cos\theta_1$

$\cos\beta_2=\cos\theta_2$.

Таким образом, получаем:

$$\int_s B \cos \beta \, ds = -\int_{s_1} B_1 \cos \theta_1 \, ds_1 + \int_{s_2} B_2 \cos \theta_2 \, ds_2 = 0.$$

В силу однородности поля имеем право считать:

$B_1\cos\theta_1=\text{const}$, $B_2\cos\theta_2=\text{const}$. Тогда

$$B_1 \cos\theta_1 \int_{s_1} ds_1 = B_2 \cos\theta_2 \int_{s_2} ds_2$$

или

$$B_1 \cos\theta_1 s_1 = B_2 \cos\theta_2 s_2.$$

Так как $s_1=s_2$,

то

$$B_1 \cos\theta_1 = B_2 \cos\theta_2. \qquad (24)$$

Деля равенства (23) и (24) одно на другое» получаем:

$$\frac{H_1}{B_1} \operatorname{tg}\theta_1 = \frac{H_2}{B_2} \operatorname{tg}\theta_2$$

или

$$\frac{1}{\mu_1} \operatorname{tg}\theta_1 = \frac{1}{\mu_2} \operatorname{tg}\theta_2.$$

Отсюда окончательно имеем:

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \qquad (25)$$

т. е. при переходе магнитного потока из среды с магнитной проницаемостью μ_1 в среду с проницаемостью μ_2 тангенсы углов падения и преломления относятся как магнитные проницаемости соответствующих средин.

Таким образом, если $\mu_2>\mu_1$, то и $\operatorname{tg}\theta_2>\operatorname{tg}\theta_1$, откуда следует, что магнитные линии во второй среде будут в этом случае больше отклонены от нормали (рис. 64), т. е. будут сгущаться.

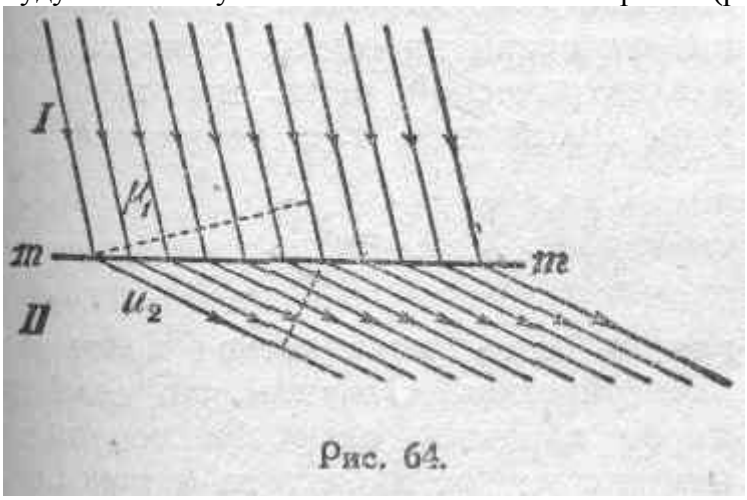


Рис. 64.

Число магнитных линий, приходящихся на единицу поверхности, нормальной

к направлению магнитного потока (см. пунктирные линии), будет во II среде больше, чем в I, т. е. $B_2>B_1$ Рассмотрим еще случай, когда магнитный поток нормален к поверхности раздела ($\theta_1 = 0$). Так как отношение — всегда конечно,

то если один из этих углов равен нулю, то и другой также равен нулю, т. е. в обеих срединах магнитные линии нормальны к поверхности раздела, и, следовательно, значения магнитной индукции одинаковы (рис. 65).

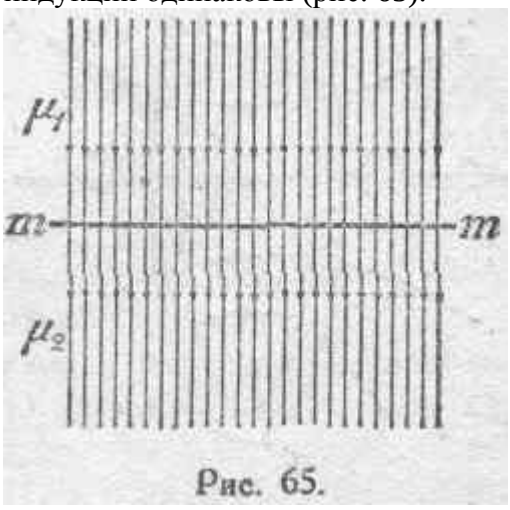


Рис. 65.

В качестве замечания, имеющего практическое значение при построении картин магнитного поля в электромагнитных механизмах, содержащих железо, укажем, что при переходе из воздуха в железо магнитные линии в воздухе обычно составляют с нормалью к поверхности раздела угол, практически близкий к нулю. В самом деле, магнитная проницаемость железа во много раз превосходит магнитную проницаемость воздуха. Пользуясь соотношением

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$$

увидим, что для случая перехода из воздуха ($\mu_1=1$) в железо (μ_2)

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2} = \frac{1}{\mu_2},$$

т. е. даже при практически большом значении θ_2 угол θ_1 будет иметь величину сравнительно очень малую.

§ 28. Принцип инерции магнитного потока.

Общие аналогии. В заключение главы о свойствах магнитного потока вкратце остановимся на некоторых общих соображениях и механических аналогиях, позволяющих взглянуть на магнитный поток с новой точки зрения и притти к представлению об инер-

115

ции магнитного потока. Мы коснемся этого вопроса в главе VII, но полезно теперь же осветить некоторые основные положения, иллюстрирующие это свойство магнитного потока. Подобно тому как в механике при изучении движения сколь угодно сложных систем мы исходим из законов движения одной материальной точки, так и в области электромагнитных явлений в самых сложных системах мы встречаемся со свойствами, которые отчетливее всего выявляются на простейших случаях.

Возьмем единичный контур простой формы, несущий ток i (рис. 66), и попытаемся найти некоторые аналогии в явлениях, сопровождающих процесс тока в таком контуре, с тем, что наблюдается при движении материальной точки.

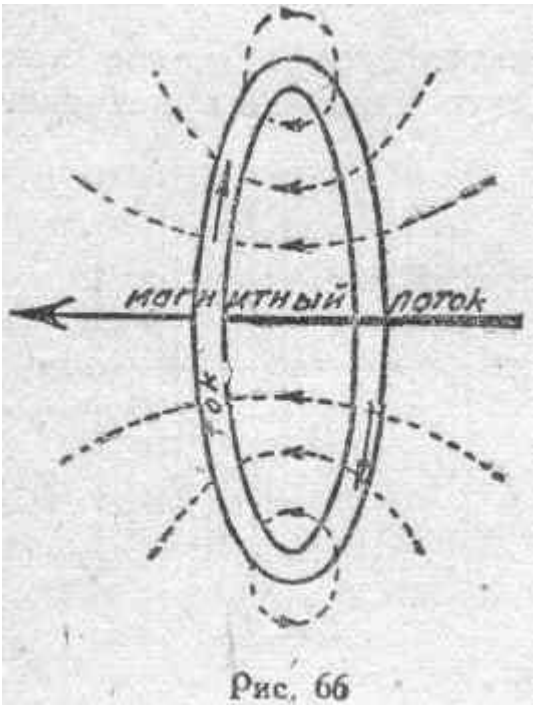


Рис. 66

Нет сомнения в том, что электрический ток есть явление кинетического характера. Этот кинетический процесс, происходящий в электрической цепи, мы характеризуем силой тока, т. е. величиной

$i=dq/dt,$

где q есть количество протекшего электричества. Отметим, что сила тока имеет характер скорости совершенно независимо от характера наших представлений о природе электрического тока.

В механической системе скорость материальной точки выражается, как известно, величиной

$v=dl/dt,$

где l есть путь, пройденный точкой.

Сопоставление этих двух выражений дает нам первую аналоги» между явлениями в электрической цепи, с одной стороны, и в механической системе—с другой: и в том и в другом случае явление характеризуется скоростью происходящего процесса. Исходя, по существу, из этой аналогии и ее дальнейшего развития, Максвелл построил свою динамическую теорию злектромагнитизма.

Перейдем теперь к энергии системы в том же простейшем случае. Укажем, что мы должны представлять себе запас энергии, связанной с контуром тока, не сосредоточенным внутри проводника, а распределенным в пространстве, его окружающем. Раньше мы показали (§ 21), что энергия магнитного поля вокруг проводника с током, т. е. энергия потока самоиндукции, выражается величиной

$^1/_2Li^2$.

116

Это и есть величина запаса энергии, связанной с данным контуром и обусловленной тем, что по нему протекает электрический ток.

С другой стороны, мы знаем, что живая сила материальной точки выражается величиной

$^1/_2mv^2$.

Последние два выражения также совершенно аналогичны по форме. При атом сила тока i соответствует скорости v, коэффициент самоиндукции L—коэффициенту инерции или массе m, энергия потока самоиндукции $^1/_2Li^2$ — живой силе $^1/_2mv^2$, поток самоиндукции $Li=\Phi_s$ — количеству движения mv.

Здесь $Li=\Phi_s$ есть магнитный поток, сцепляющийся с нашим контуром тока. Как видим, он соответствует количеству движения материальной точки, т. е. произведению скорости этой точки на коэффициент, характеризующий ее инерцию (m). Проводя аналогию дальше, можно сказать, что коэффициент самоиндукции L характеризует собою инерцию электромагнитной системы.

Известно, что в материальной системе количество движения стремится сохранить свою величину. В изолированной системе, в которой отсутствует сопротивление среды, вызывающее рассеяние энергии, закон постоянства количества движения полностью осуществляется. Рассмотренная нами аналогия наводит нас на мысль, что и в электромагнитной системе должно иметь место то же самое, т. е. магнитный поток, связанный с проводящим контуром, должен стремиться сохранить свою величину неизменной. Как мы увидим в дальнейшем, это и имеет место на самом деле.

Итак, мы можем говорить о законе инерции в применении к электромагнитной системе совершенно так же, как мы говорим о законе инерции, которому подчиняются системы механические. В последних этот закон выражается в стремлении количества движения сохранять свою величину, инерция же электромагнитных систем проявляется в стремлении к постоянству магнитного потока, с ними связанного.

Если в механической системе изменять количество движения, то в виде реакции возникают так называемые даламберовские силы инерции, которые в рассматриваемом простейшем случае выражаются так:

$$f_{\text{д}} = -mw = -m\frac{dv}{dt} = -\frac{d(mv)}{dt},$$

где w=dv/dt есть ускорение.

Соответственно этому, при всяких попытках изменить магнитный поток Φ_s, сцепляющийся с рассматриваемым контуром, в по-

следнем возникает электромагнитная реакция в виде ЭДС самоиндукции e_s, причем величина ее будет

$$e_s = -\frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\Phi_s}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции и по форме и по природе своей, а также по своему действию вполне аналогична даламберовской силе инерции. Действительно, в механической системе даламберовская сила инерции математически выражается взятой с обратным знаком производной по времени от количества движения. В электромагнитной системе ЭДС самоиндукции соответственно выражается через взятую с обратным знаком производную по времени от магнитного потока Φ_s (напомним, что $\Phi_s=Li$ имеет характер, аналогичный количеству движения). И затем, на целом ряде примеров мы можем убедиться, что, подобно тому как даламберовская сила инерции стремится противодействовать всякому изменению количества движении в механической системе, ЭДС индукции имеет стремление противодействовать всякому изменению потока, сцепляющегося с контуром тока. Это положение справедливо в самом общем случае.

Рассмотрим в качества примера простейший контур тока (рис. 66). Направление тока и магнитного потока самоиндукции $\Phi_s=Li$ внутри контура показано стрелками. Как только Φ_s претерпевает изменение, например, в связи с изменениями тока, возникает тотчас

ЭДС самоиндукции, причем, если $d\Phi_s/dt>0$, то

$e_s<0$.

Обратно, если $d\Phi_s/dt<0$, то

$e_s>0$.

Таким образом, ЭДС самоиндукции всегда обратного знака по отношению к изменению магнитного потока; она стремится так изменить ток, чтобы ослабить изменение магнитного потока, связанного с контуром.

Обратимся к ньютоновской силе в механической системе. Она выражается следующим образом:

$$f_N = mw = m\frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = -f_D.$$

Таково выражение приложенной к системе *внешней* механической силы. Эта сила идет, как показывает последнее выражение, на сообщение ускорения, т. е. на преодоление даламберовской силы инерции. В случае, если, кроме силы инерции, сообщению ускорения препятствует еще сопротивление среды, то часть внешней силы расходуется на преодоление этого сопротивления, остальная же часть—на преодоление инерции.

118

Соответственно этому, в электромагнитной системе приложенная к контуру, *внешняя* ЭДС обыкновенно частью расходуется на преодоление омического сопротивления, частью же компенсирует обратную ЭДС самоиндукции. Таким образом в соотношении

$$e' = -e_s = L\frac{di}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = \frac{d\Phi_s}{dt}$$

представляет собою остаток внешней ЭДС, за вычетом части, израсходованной на преодоление омического сопротивления.

Итак, во всех явлениях, связанных с существованием магнитного потока, мы находим полную аналогию между механической и электромагнитной системами, причем аналогия эта, повидимому, не случайна.

Все сказанное о потоке самоиндукции справедливо для всякого магнитного потока, сцепляющегося с контуром. Всегда

$e=-d\Phi/dt,$

т.е. всякую ЭДС индукции мы можем рассматривать как даламберовскую силу инерции.

Возникает вопрос: если магнитному потоку присуще свойство инерции, то возможно ли изменить величину магнитного потока, связанного с контуром? Та же самая механическая аналогия приводит к заключению, что это возможно. В механической системе мы можем изменить количество движения, даже, например, остановить движущееся тело, пользуясь сопротивлением среды, вызывающим рассеяние энергии. Аналогично и в системе электромагнитной при наличии сопротивления проводников, вызывающего рассеяние энергии, мы можем изменить величину потока, связанного с проводящим контуром.

Мы знаем, что механика материальной системы, изучая явления движения, рассматривает сначала эти явления в наиболее чистом виде, отвлекаясь от сопротивления среды. Подобно этому, при выяснении сущности того, что происходит в электромагнитной системе, полезно рассматривать явления для контуров, не обладающих сопротивлением, т. е. не способных рассеивать электромагнитную энергию путем превращения ее в тепло.

Разберем случай сверхпроводника, т. е. проводника с сопротивлением, равным нулю: $r=0$. Как показывает опыт, можно сделать сопротивление некоторых проводников равным нулю, охлаждая их до температур, очень близких к абсолютному нулю. Рассмотрим некоторый замкнутый контур, с которым сцепляется внешний магнитный поток Φ_0. Допустим, что поток этот создается постоянным магнитом, который подносится к проводнику при нормальной температуре. Охладив затем проводник до температуры, близкой к абсолютному нулю, т. е. получив

r=0

119

удаляем магнит. В проводнике индуктируется ЭДС:

$$e = -\frac{d\Phi_0}{dt},$$

создающая электрический ток. Но возникновение тока вызовет появление в рассматриваемом контуре противодействующей ЭДС самоиндукции. Если через Φ_s обозначим поток самоиндукции, то на основании закона Ома ($\Sigma e=ri$) мы можем написать:

$$-\frac{d\Phi_0}{dt}-\frac{d\Phi_s}{dt}=ri.$$

Посмотрим, чему равняется величина *ri*. Как сказано, r=0. С другой стороны, *i* не бесконечно большая величина. Это ясно как из .общих соображений (*i* имеет характер скорости и потому не можем сразу же получить беспредельно большие значения), так и из опыта, показавшего, что в этом случае *i*—величина конечная. Таким образом, получаем:

ri=0

или

$$-\frac{d\Phi_0}{dt}-\frac{d\Phi_s}{dt}=0,$$

что, в свою очередь, приводит к соотношению

$\Phi_0+\Phi_s$=const.

Совершенно ясно, что $\Phi_0+\Phi_s$ есть полный магнитный поток, связанный с сверхпроводящим контуром в каждый данный момент. Обозначив его через Ф, имеем:

$\Phi=\Phi_0+\Phi_s$=const.

В этом и заключается смысл описанного опыта; мы не в силах изменить величины магнитного потока, сцепляющегося с проводящим контуром, если в нем кет рассеяния энергии. Пока с контуром сцепляется только внешний поток Φ_0, в контуре нет электрического тока и, следовательно, нет потока самоиндукции Φ_s. Когда мы удаляем внешний поток, возникает электрический ток, и с контуром сцепляется поток самоиндукции Φ_s, в точности равный удаленному внешнему потоку. Все попытки изменить поток, сцепляющийся с контуром в случае r=0, должны быть безрезультатны. Если нет рассеяния энергии, то неизменность связанного с контуром потока строго соблюдается. Подробнее о смысле приведенного опыта мы будем говорить ниже, в главе о природе электрического тока. Пока же ограничимся полученным выводом, что магнитный поток не только стремится, но и может оставаться неизменным, совершенно подобно тому, как количество движения в материальной системе может сохраняться и остается неизменным в случае отсутствия сопротивлений, способных рассеивать энергию.

120

§ 29 Общая формулировка принципа инерции магнитного потока. Флюксметр.

Как известно, между проводником с током, помещенным во внешнее магнитное поле, и полем наблюдается сила механического взаимодействия, так называемая электромагнитная сила, величина которой определяется соотношением

$f=Bli\sin\theta$.

Впоследствии (см. гл. VII) мы займемся более подробно изучением механических сил, возникающих в электромагнитной системе пока же ограничимся указанием, что действие этих сил имеет тот же характер, что и проявления даламберовской силы инерции: они, вообще говоря, противодействуют изменению величины внешнего магнитного потока, связанного с проводящим контуром. Всякий раз, когда внешний механический агент вызывает такое движение проводящего контура в магнитном поле, которое связано с изменением пронизывающего контур внешнего потока, этот агент встречает противодействие со стороны электромагнитной силы, сопротивляющейся движению. Это явление

всегда имеет место. Как известно, оно находит себе выражение в законе Ленца. Все эти взаимодействия представляют собою проявления инерции магнитного потока. Обобщая понятие об электромагнитной инерции, мы можем формулировать принцип инерции магнитного потока таким образом: при всяком изменении внешнего магнитного потока, сцепляющегося с проводящим контуром, в последнем возникают силы как механического, так и электрического характера, стремящиеся сохранить величину магнитного потока.

В обычной обстановке, вследствие наличия омического сопротивления и связанного с ним рассеяния анергии, мы встречаемся с возможностью изменений внешнего потока, связанного с проводящим контуром. Однако, в некоторых специальных случаях магнитный поток остается постоянным или, в крайнем случае, восстанавливается до своей первоначальной величины после ряда преобразований энергетического характера, протекших в системе. Один из таких примеров рассмотрен выше; это именно случай сверхпроводящего контура, когда магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром, никоим образом ни на момент не может быть изменен. Другим примером может служить прибор, предназначенный для измерения магнитного потока и носящий название флюксметра. В этом случае электрическое сопротивление цепи обычно не равно нулю и имеет некоторое конечное значение.

Флюксметр устроен подобно гальванометру Депре-д'Арсонваля (рис. 67).

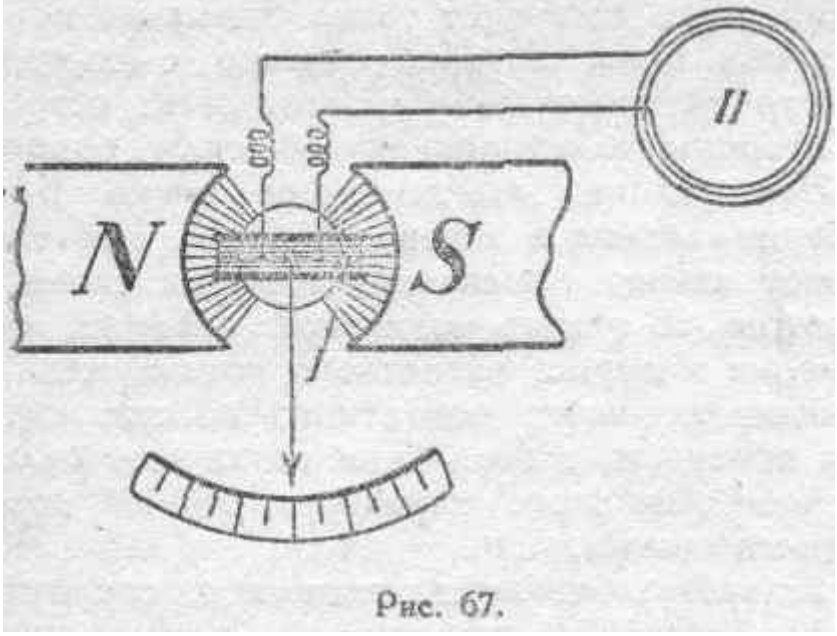


Рис. 67.

Между полюсами постоянного магнита помещена легкая рамка 1 из n_1 витков изолированной проволоки. Рамка эта подвешена на кононовой нити в равномерном радиальном поле в ыеждужелезном пространстве. Концы обмотки выведены через посредство тончайших серебряных спиралек наружу и соединены с состоящей из n_2 витков катушкой II. При введении в катушку II некоторого

121

магнитного потока $\Delta\Phi_2$, в ней индуктируется ЭДС. Возникающий при этом электрический ток i, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создаст вращающий момент, отклоняющий рамку от нулевого положения. На основании принципа инерции магнитного потока, сцепляющегося с контуром, в данном случае составленным аз n_1 витков рамки I, соединительных проводов и n_2 витков катушки II, мы можем утверждать, что рамка будет стремиться поворачиваться так, чтобы охватываемая ею часть потока постоянного магнита изменилась на величину $\Delta\Phi_1$, удовлетворяющую следующему соотношению:

$$n_1\Delta\Phi_1+n_2\Delta\Phi_2=0.$$

Что действительно в случае флюксметра между $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ будет существовать вышеуказанное соотношение, можно доказать следующими рассуждениями. Если длина рамки есть *l*, ширина ее—a, сила тока—*i* и магнитная индукция в междужелезном пространстве— *B*, то вращающий момент, создаваемый парой сил взаимодействия электрического тока с полем постоянного магнита (в этом случае $\sin\theta=1$), будет выражаться следующим образом:

$M=n_1Blai.$

Примем теперь во внимание следующие весьма существенное в данном случае обстоятельство: тормозящим моментом от трения о воздух, от пары кручения подвеса и пр. можно пренебречь в силу его незначительности, обусловленной специальной конструкцией прибора. В таком случае результирующий импульс пары сил, действующих на рамку, сведется к следующему выражению:

$$\int_0^t n_1 Blai\ dt = n_1 Bla \int_0^t i\ dt.$$

Этот импульс должен быть равен приращению момента количества движения за промежуток времени от 0 до *t*. Изберем в качестве пределов интегрирования момент начала движения рамки момент ее остановки, после того как всякие изменения в рассматриваемой электромагнитной системе закончились. Так как в обоих крайних положениях рамка находится в покое, то

приращение момента количества движения равно 0, и, следовательно,

$$n_1 Bla \int_0^t idt = 0,$$

т.е

$$\int_0^t idt = 0.$$

Интегрируя, получаем:

$q=0,$

т. е. полное количество электричества, протекшее по цепи за время движения рамки, равно 0. Это показывает нам, что за время передвижения рамки по ней последовательно протекают токи в двух противоположных направлениях.

Обратимся к основному закону индукции, данному Фарадеем:

$q=\Delta\Phi/r,$

где через $\Delta\Phi$ обозначено полное число пересечений контура тока магнитными линиями, т. е. приращение числа сцеплений контура с внешним магнитным потоком. В нашем случае

$q=-\Delta\Phi/r=0.$

На основании этого имеем:

$\Delta\Phi=0.$

Но полное изменение потока, сцепляющегося с нашим контуром, составляется из изменений $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$, причем должны быть приняты во внимание числа витков n_1 и n_2. Таким образом,

$\Delta\Phi=n_1\Delta\Phi_1+n_2\Delta\Phi_2=0,$

что и требовалось доказать.

Отсюда следует:

$\Delta\Phi_2=-n_1/n_2\Delta\Phi_1$

Обычно шкала во флюксметре градуируется таким образом, что положение стрелки прибора непосредственно дает $n_1\Delta\Phi_1$ считая от начального положения стрелки. Обозначая число максвеллов, соответствующих одному делению шкалы, через φ и через α—число делений шкалы, на которое стрелка переместилась в процессе намерения $\Delta\Phi_2$, получаем:

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{1}{n_2}\varphi\alpha.$$

123

Итак, в случае: флюксметра, несмотря на наличие проводящего контура, обладающего сопротивлением, не равным нулю, магнитный поток, сцепляющийся с контуром, после всякого рода изменений в системе в конце концов имеет ту же величину, что и вначале. Если нарастание потока $\Delta\Phi_2$ происходит достаточно медленно, то можно показать, что полный поток, сцепляющийся с контуром, с большою степенью точности все время сохраняет свою величину. Если же нарастание потока $\Delta\Phi_2$ происходит чрезвычайно быстро (практически мгновенно), принцип инерции магнитного потока находит свое выявление через посредство свойства инерции материальных частей электромагнитной системы, и это имеет результатом восстановление первоначальной величины магнитного потока, сцепляющегося с данным проводящим контуром.

Так как практически тормозящий момент вредных механических сопротивлений никогда не равен нулю, то для возможного уменьшения погрешностей, проистекающих отсюда при измерениях с помощью флюксметра, его цепь должна иметь минимальное электрическое сопротивление. В связи с этим основной момент электромагнитной силы в среднем будет во много раз больше вредного тормозящего момента, так что последним фактически можно пренебречь.

124

ГЛАВА II. Магнитные свойства вещества.

§ 30. Роль вещества в магнитном процессе.

Как известно, на явления, в магнитном поле наблюдаемые, влияют особые качества вещества, заполняющего пространство, в котором существует поле. Вещество так или иначе участвует во всех магнитных процессах, и способность вещества принимать в них большее или меньшее участие можно характеризовать (см. § 2) коэффициентами χ или μ, связанными между собою соотношением (2):

$\mu=\mu_0+4\pi\chi$.

При этом магнитная восприимчивость χ указывает степень непосредственного участия вещества, как такового, т. е. определяет собою намагничение вещества (так называемую напряженность намагничения *Г*). От магнитной же проницаемости μ зависит величина результирующей плотности магнитного потока в данном месте, т. е. величина магнитной индукции *B*, которая в принятых нами единицах именно равна числу максвеллов, приходящихся на один кв. сантиметр поверхности, поперечной потоку. Эта плотность потока, действительно наблюдаемая в магнитном поле, должна выражаться суммой двух слагаемых. Первое представляет собою то, что было бы, если бы в данном месте пространства отсутствовало вещество и мы имели дело только с магнитным процессом в пустоте. Величина этого первого слагаемого есть $\mu_0 H$, где *H*— магнитная сила. Второе слагаемое, равное $4\pi I$, есть то, что привносится в величину магнитной индукции *B* благодаря участию в магнитном процессе вещества, находящегося в данном месте. Таким образом, известное соотношение (1):

$B=\mu_0 H+4\pi I$,

или, что то же:

$\mu H=\mu_0 H+4\pi\chi H$,

имеет совершенно определенный физический смысл.
125

§ 31. Фиктивность „магнитных масс".

Внешним признаком участия вещества в магнитных явлениях принято считать так называемые „магнитные массы", которые мы обычно приписываем тем частям поверхности тела (полюсам), через которые магнитный поток входит в данное тело или выходит из него. Особенно резко это обстоятельство обращает на себя внимание в случаях сильно магнитных материалов, как-то: стали, железа *а* т. п. Так, например, стальная, продольно намагниченная полоса обладает двумя полюсами, расположенными на ее концах. Тот полюс, из которого магнитный поток выходит во внешнее пустое пространство, называется северным или (условно) положительным. Другой полюс, через который магнитный поток входит в магнит извне, называется южным, или отрицательным. Соответственным образом магнитные массы, которые мы мысленно располагаем на этих полюсах, называются северной (положительной) и южной (отрицательной).

Оперируя с магнитными массами как с некоторыми количествами, можно, как известно, весьма полно описать с формальной стороны явления, наблюдаемые в магнитном поле (см. § 1). Закон Кулона представляет собою основное исходное математическое соотношение, связывающее механические проявления магнитного поля с магнитными массами и расстоянием между ними. При этом явление рассматривается так, как будто бы полюсы действуют друг на друга на расстоянии. Как ни совершенны результаты, достигнутые рассмотрением магнитного поля с этой точки зрения, т. е. с точки зрения дальнодействия, все же опыт заставляет признать, что этот метод, оставаясь *вполне точным* в смысле формального описания, не охватывает некоторых существенных сторон явлений, имеющих место в магнитном поле. Мы, например, оперируем с изолированной магнитной массой одного знака, говорим о „единице положительного магнитизма" так, как будто бы такая магнитная масса может существовать сама по себе. На самом деле, как мы знаем, не может быть магнита с одним магнитным полюсом. Мм никак не можем путем деления магнита на части или иначе отделить от него один полюс с расположенной на нем магнитной массой одного знака. В этом отношении есть принципиальное различие между тем, что мы называем магнитной массой, и тем, что мы называем электрическим зарядом, который, вообще говоря, ведет себя как некоторая самостоятельная физическая сущность. Весь наш опыт в области свойств магнитного поля показывает, что магнитные массы не обнаруживают основных признаков самостоятельного существования. Свободных магнитных масс, подобных свободному электричеству, не наблюдается нигде и никогда. Наоборот, всегда и везде то, что мы в обычной математической теории магнетизма называем магнитными массами или количествами магнитизма, является и по знаку и в количественном отношении лишь некоторой функцией магнитных качеств Тех веществ, через которые проходит магнитный поток. Фарадей, установивший основные
126

законы магнитного поля, понимаемого как некоторый *непрерывный* процесс, распространенный по всему объему, занятому полем, экспериментально доказал участие в этом процессе вещества, заполняющего пространство, и вместе с тем обратил внимание на чистую условность нашего обычного представления о магнитных массах.

Итак, согласно воззрениям Фарадея, магнитные массы, наблюдаемые в местах перехода магнитного потока из среды с одной магнитной проницаемостью в среду с другой проницаемостью, представляют собою явление кажущееся, зависящее исключительно от изменения магнитной проницаемости. Поверхностную плотность магнитизма σ (§ 2), т. е. магнитную массу, которую мы приписываем единице поверхности полюса, легко связать с плотностью магнитного потока B и с величинами магнитных проницаемостей обеих средин.

Действительно, обратившись к основным определениям (§ 2), мы видим, что поверхностная плотность магнитизма σ, обнаруживаемая на полюсной поверхности тела, являющейся границей его

с внешним пустым пространством, равна напряженности намагничения *I*, которою обладает тело (рис. 3) в связи с прохождением магнитного потока через него. Если бы данное тело было окружено не пустотой, а тем же веществом, из которого состоит это тело, то на той же поверхности мы имели бы
$\sigma=0$.

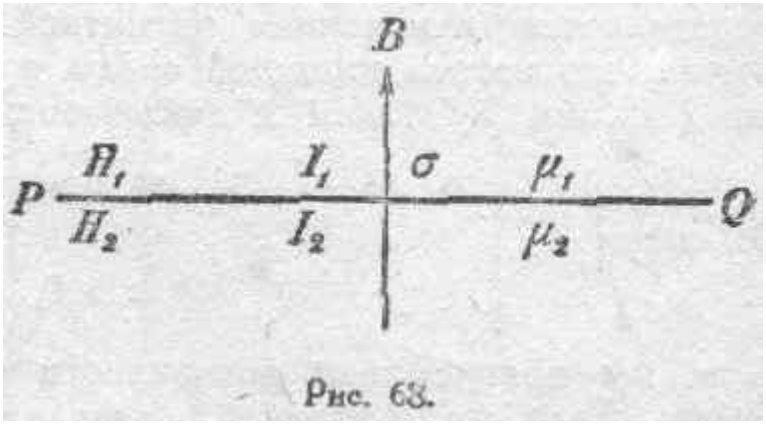


Рис. 68.

Вообще, если мы имеем две среды с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2, поверхность раздела которых есть плоскость *PQ* (рис. 68) и в которых магнитная сила и напряженность намагничения суть H_1 и H_2, I_1 и I_2, и если при этом сквозь эти среды проходит однородный магнитный поток из второй, например, среды в первую, перпендикулярно поверхности раздела, то плотность магнетизма σ на этой поверхности будет определяться по величине и по знаку следующим соотношением:
$\sigma=I_2-I_1$.
Принимая во внимание, что магнитная индукция *B* будет в данном случае одна и та же в обеих срединах (см. § 27), можем
написать:
$B=\mu_0 H_1+4\pi I_1=\mu_0 H_2+4\pi I_2$
откуда получаем:

$$I_1=\frac{1}{4\pi}(B-\mu_0 H_1),$$
$$I_2=\frac{1}{4\pi}(B-\mu_0 H_2).$$

127

На основании этого имеем:

$$\sigma=\frac{\mu_0}{4\pi}(H_1-H_2).$$

Так как далее

$$H_1=\frac{1}{\mu_1}B,$$
$$H_2=\frac{1}{\mu_2}B,$$

то получаем окончательно:

$$\sigma=\frac{1}{4\pi}\frac{\mu_0(\mu_2-\mu_1)}{\mu_1\mu_2}B. \quad (26)$$

Итак, мы видим, что поверхностная плотность того распределения магнитных масс, которое нам кажется существующим на поверхности раздела двух средин, в количественном отнесении определяется изменением магнитной проницаемости при переходе магнитного потока из одной среды в другую. Обследуя соотношение (26), мы приходим к заключению, что если в данном случае $\mu_2>\mu_1$, то имеем

$\sigma>0$,

т. е. мы приписываем поверхности раздела северные магнитные массы. Если же, например, оставляя вторую среду неизменной мы подберем теперь первую среду так, чтобы получилось соотношение $\mu_2<\mu_1$, то будем иметь

$\sigma<0$,

.и нам покажется, что на той же самой поверхности расположены теперь южные магнитные массы.

Для экспериментальной проверки подобных логических выводов Фарадей поставил следующие опыты. Он приготовил несколько водных растворов парамагнитной соли железа различной концентрации и наполнил этими растворами стеклянные запаянные трубочки. Подвешивая эти трубочки горизонтально на нитях, прикрепленных к средине каждой трубочки, и помещая их между полюсами магнита в воздухе, Фарадей наблюдал, как и следовало ожидать, аксиальное расположение трубочек (рис. 69), т. е. они все вели себя как железные стержни, располагаясь вдоль магнитных линий. Когда же Фарадей в сосуд С, расположенный между полюсами *N и S* так, что он окружал трубочку, наливал раствор соли железа высшей концентрации, чем раствор в трубочке, то последняя поворачивалась и занимала экваториальное положение, перпендикулярно магнитным линиям (рис. 70), т. е. в этом случае трубочки вели себя как

128

стержни из висмута. Если же в сосуд, С наливался раствор меньшей концентрации, чем в испытуемой трубочке, то расположение неизменно получалось аксиальное (рис. 69). Подвесив какую-либо трубочку с раствором промежуточной концентрации, Фарадей мог, изменяя соответствующим образом концентрацию раствора, наливаемого в сосуд С, заставить ту же самую трубочку принимать то аксиальное расположение (рис. 69), то экваториальное расположение (рис. 70).

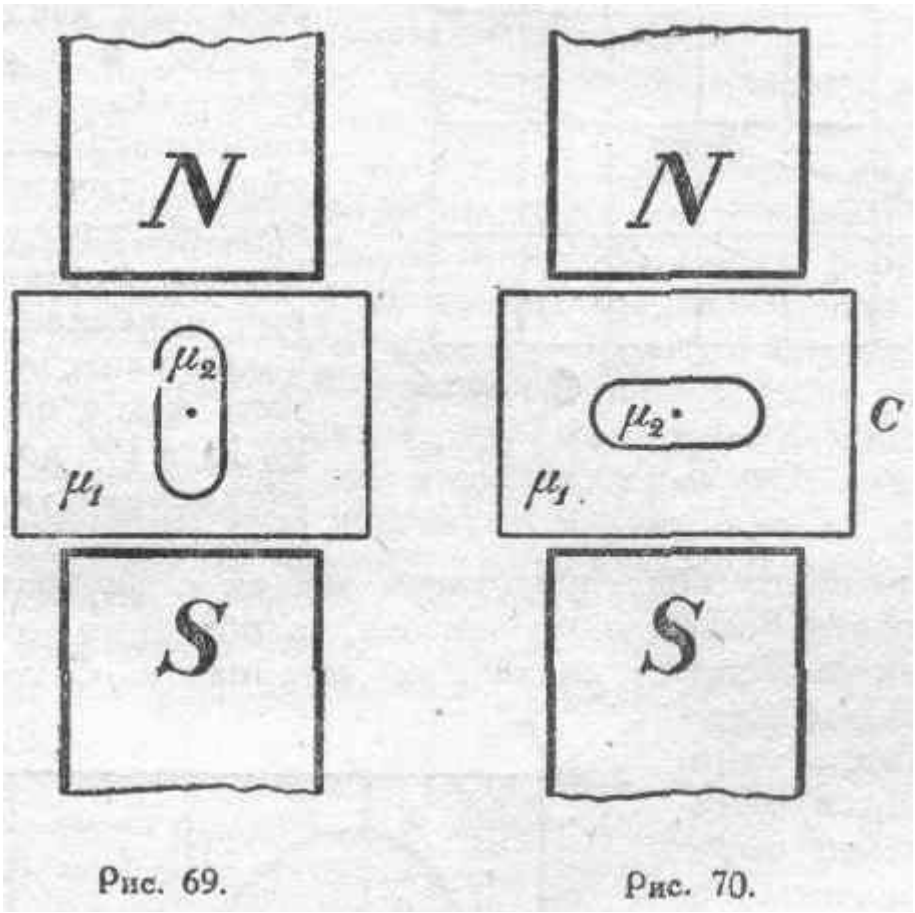


Рис. 69. Рис. 70.

Расположение аксиальное получалось, когда $\mu_2>\mu_1$ т.е. тогда, когда все происходило так, как будто бы на частях поверхности трубочки, обращенных к полюсам магнита, появляются магнитные массы противоположной полярности: концы трубочки „притягиваются" к полюсам *N к S. B* случаях же экваториального расположения, т. е. когда $\mu_2<\mu_1$ все происходило так, как будто бы на частях поверхности трубочки, обращенных к полюсам магнита появляются магнитные массы той же полярности, что и на полюсах: концы трубочки „отталкиваются" от полюсов *N и S.*

Фарадей всячески разнообразил опыты этого рода, применяя не один сосуд С, а несколько подобных сосудов, располагаемых один в другом и заполняемых растворами различных концентраций. Это необходимо было Фарадею для проверки некоторых соображений относительно роли промежуточной среды. Результаты всех этих опытов чрезвычайно ценны в том отношении, что дают обильный материал для суждения об относительности представления о магнитных массах, которые кажутся существующими в реальной обстановке. Других магнитных масс, кроме этих кажущихся, мы нигде и никогда не наблюдаем.

129

[1]) ***Faraday, Experimental Researches in Electricity §§ 3313 — 3317.***

§ 32. Общая характеристика магнитных материалов.

В предыдущем параграфе было в достаточной степени выяснено, что участие вещества в тех процессах, которые имеют место в магнитном поле, выражается не в том, что отдельные элементы вещества обладают якобы определенными „магнитными зарядами", несут на себе определенные магнитные массы. Если это нам иногда кажется и если формально мы имеем право оперировать с этими фиктивными массами, то все же существо дела заключается не в этом, а в роли вещества как „проводника" магнитного потока, С этой именно точки зрения и приходится оценивать магнитные материалы, которые применяются в технике в качестве элементов того магнитопровода (см. §§ 18 и 19), который образует замкнутую магнитную цепь.

Для правильного конструирования машин и аппаратов, использующих свойства магнитного потока, необходимо ознакомиться с магнитными свойствами различных материалов. С точки зрения техники наиболее интересными в этом отношении являются материалы с сильно выраженными магнитными качествами, так называемые ферромагнитные материалы. К числу их относятся железо (Fe), никкель (Ni), кобальт (Co), а также их сплавы. В последнее время появились сплавы, не содержащие ясно выраженных ферромагнитных исходных материалов, но тем не менее обладающие довольно заметно выраженными магнитными качествами.

Известно, что основной особенностью ферромагнитных материалов является то обстоятельство, что магнитная проницаемость их, во-первых, значительно больше единицы и, во-вторых, зависит от

магнитного состояния вещества. Кроме того, для каждого данного значения H или B магнитная проницаемость μ может иметь бесчисленное множество значений, в зависимости от ряда обстоятельств, в особенности от предыдущих магнитных состояний данного вещества, от температуры, от механических напряжений и т. д.

Для характеристики магнитных свойств всякого вещества пользуются величинами B, H, μ, I, χ, которые, как уже указывалось, связаны между собою следующими зависимостями (см. § 2):

$$B = \mu_0 H + 4\pi I, \quad B = \mu H, \quad I = \chi H, \quad \mu = \mu_0 + 4\pi\chi.$$

В тех случаях, когда магнитная проницаемость не является величиной постоянной, для характеристики магнитных свойств наиболее удобно пользоваться графическими изображениями зависимостей между указанными величинами. В технике чаще всего пользуются зависимостями между B и H, которая в общем имеет вид, указанный на рис. 71.

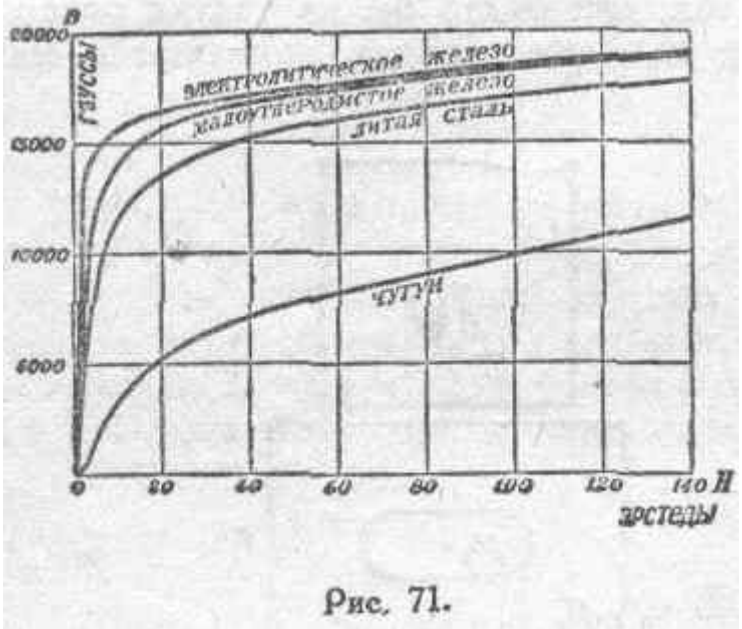


Рис. 71.

На этом рисунке в виде примера приведены основные кривые намагничения некоторых употребительных ферромагнитных материалов. Из характера этих кривых мы видим, что с увеличением напряжения магнитного поля H магнитная индукция B непрерывно возрастает, причем скорость этого возрастания не постоянна. Точное обследование показывает, что с самого начала возрастание B идет несколько медленнее, чем в последующей стадии намагничения (это ясно видно на кривой чугуна). В дальнейшем же, после достижения второго перегиба, скорость возрастания B уменьшается.

На рис. 72 дана кривая $\mu = f(B)$ для некоторого сорта железа.

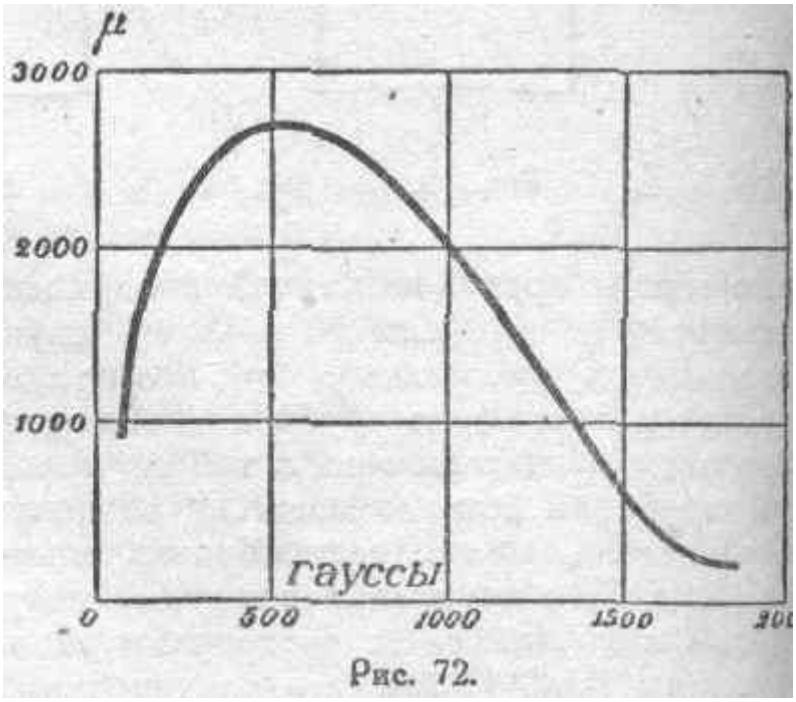


Рис. 72.

Как видим, величина μ сначала растет, затем, по достижении максимума, начинает убывать, стремясь в пределе (при больших индукциях) к μ=1.

Иногда интересно иметь кривые, связывающие *H* и *I*. Но из приведенного выше равенства: $B=\mu_0 H+4\pi I$ видно, что, имея кривую *B=f(H)*, можно простым пересчетом получить кривую *I=f(H)*. Ограничимся поэтому более подробным рассмотрением графической зависимости только между *B*, μ. и *H*, которыми в технике, как указано выше, почти исключительно и пользуются.

§ 33. Магнитный цикл.

Рассмотрим процесс переменного намагничения какого-либо ферромагнитного материала. Методы осуществления переменного намагничения весьма разнообразны. Наиболее простым в смысле условий намагничения является случай железного кольца с равномерно навитой на него обмоткой, по которой пропускается намагничивающий ток (рис. 54). При таком способе намагничения устраняется размагничивающее влияние концов. К сожалению, способ этот затруднителен в техническом отношении, и потому обычно применяют различные расположения, предназначенные для намагничения материалов в виде стержней.

Изменяя величину намагничивающего тока *i*, мы меняем *H*, силу магнитного поля внутри обмотки. Величина соответствующей маг-

131

нитной индукции *B* в исследуемом образце определяется обыкновенно при помощи баллистического гальванометра или флюксметра. Чтобы иметь возможность строить кривую, начиная с нулевого значения магнитной индукции, испытуемый образец предварительно размагничивается каким-либо способом, т. е. переводится в нейтральное в магнитном смысле состояние (см., напр., § 39, рис. 87). Будем откладывать *H* по оси абсцисс, *B*—по оси ординат в надлежащем масштабе (рис. 73).

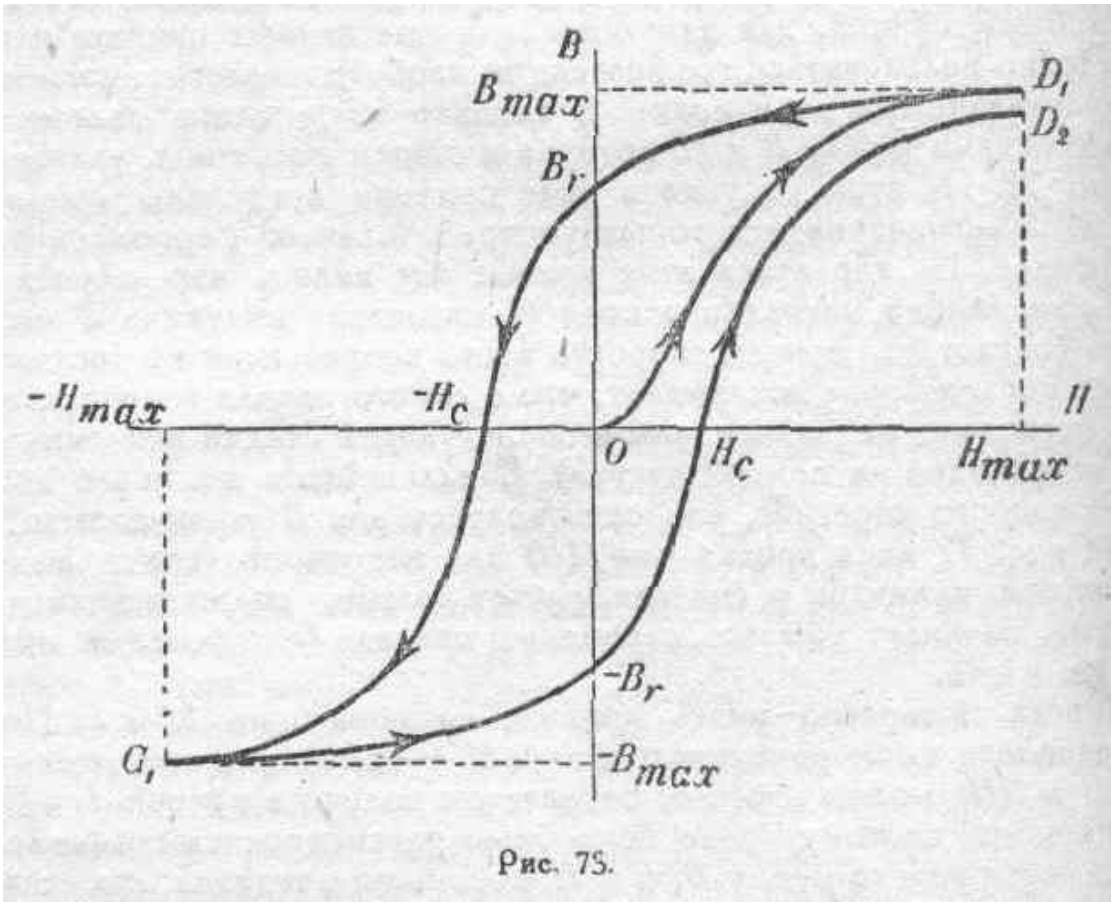


Рис. 73.

При отсутствии тока в обмотке магнитная индукция в размагниченном образце равна нулю. Повышая H, мы можем последовательно пройти *основную кривую намагничения*, дойдя до некоторой точки D_1, характеризующей наибольшее достигаемое значение магнитной индукции, $B_{шах}$, при данном наибольшем значении намагничивающей силы, H_{max}.

Начнем теперь уменьшать H и медленно дойдем до H=0. Опыт показывает, что кривая $B=f(H)$ при уменьшении H не совпадет о полученной нами ранее основной кривой OD_1, а будет лежать выше. Это явление отставания изменений магнитной индукции от изменений напряжения магнитного поля носит, как известно, название *гистерезиса*. При H=0 магнитная индукция B будет иметь теперь некоторое положительное значение, определяемое свойствами исследуемого материала и называемое остаточной индукцией или остаточным намагничением. Обозначим его через B_r,

Изменим теперь направление намагничивающего тока и начнем постепенно усиливать его. Мы таким образом будем увеличивать H в обратном направлении, величина же B, оставаясь еще положи-

132

тельной, будет уменьшаться, и при некотором значении $H=-H_c$ (рис. 73) мы будем иметь $B=0$. Магнитная сила H_c является по абсолютной величине мерой способности вещества удерживать остаточное намагничение, и поэтому ее численное значение можно называть *задерживающей силой*. Гопкинсон назвал величину — H_c *коэрцитивной*, или понудительной силой.

При дальнейшем увеличении H в сторону отрицательного максимума, B также переменит свое направление и будет возрастать, пока в точке G_1 не достигнет величины — B_{max}, соответствующей напряжению магнитного поля — H_{max}.

Уменьшая теперь абсолютное значение H до нуля, мы получим ветвь $G_1(-B_r)$, вполне аналогичную ветви $D_1(+B_r)$. Величина $-B$ представляет собою отрицательное остаточное намагничение. Опять изменяя направление намагничивающего тока и усиливая его в положительном направлении, последовательно дойдем до магнитной силы$+H_c$, необходимой для уничтожения $-B_r$. Продолжая

увеличивать силу магнитного поля H, мы будем приближаться к точке D_1. Однако мы теперь при $H=H_{\text{тmax}}$ не достигнем этой точки, а придем в некоторую точку D_2, лежащую ниже. Явление это объясняется тем, что основную кривую OD_1 мы получили, начав намагничение с нейтрального состояния вещества. Теперь же мы идем от $-B_{\max}$ или — B_{r}, и те же магнитные силы приведут, вследствие явления гистерезиса, к меньшим значениям магнитной индукции. Таким образом, получить сразу же замкнутый цикл нам не удастся. Повторив пере-

магничение еще раз, мы получим кривую гигтерезиса, весьма похожую на первую. При этом точка G_2 (на рисунке не показанная), соответствующая—H_{max}, будет лежать немного ниже G_1 закончится же цикл точкой D_3, которая будет опять же ниже D_2, так как отрицательные значения индукции получились у нас на этот раз несколько большие по абсолютной величине. Все это схематически изображено на рис. 73.

Произведя ряд подобных последовательных перемагничиваний, мы придем в конце концов к некоторому предельному циклу с вершинами D_0 и G_0, характеризующими установившийся режим перемагничивания исследуемого вещества (рис. 74).

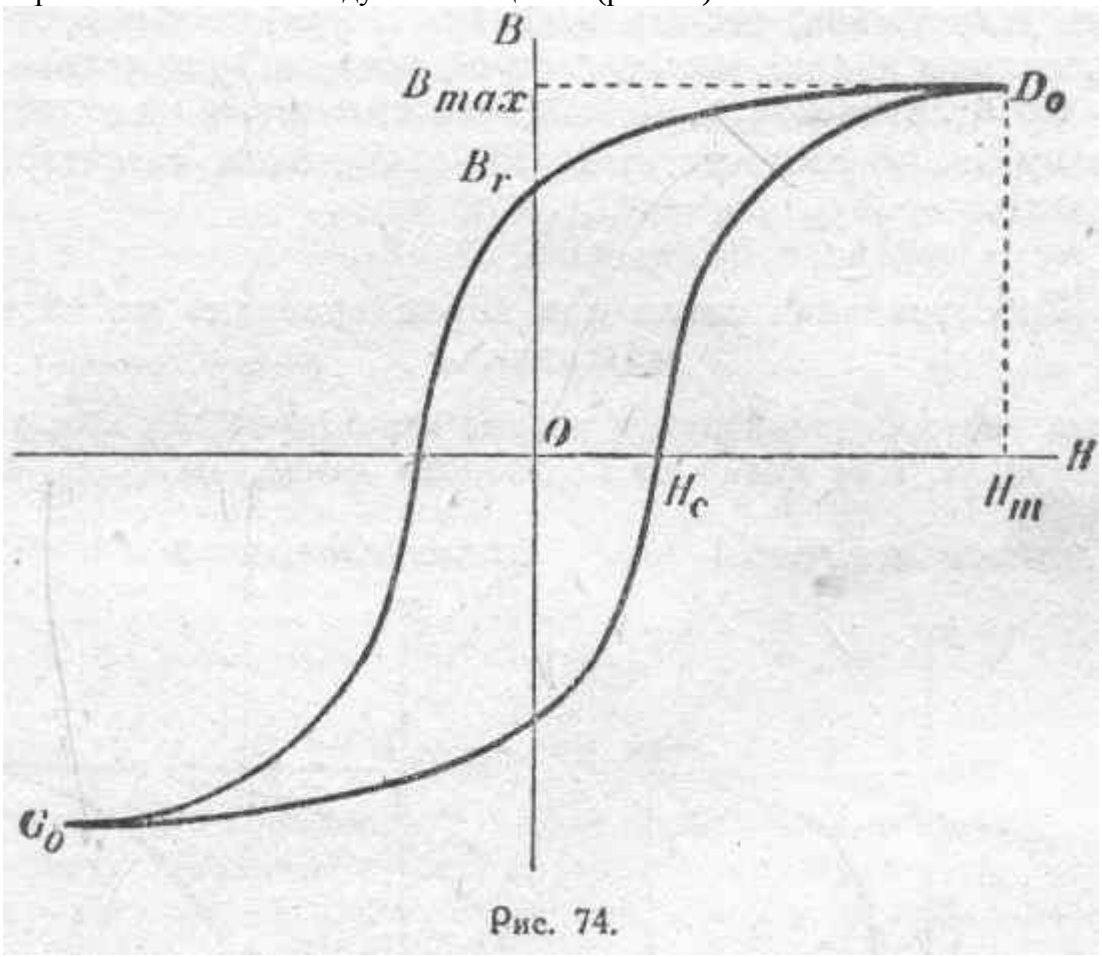


Рис. 74.

Практически для достижения устойчивого цикла достаточно произвести 5—10 перемагничиваний. Это предварительное многократное перемагничивание чрезвычайно важно для получения определенных результатов, так как величина B при данном значении H зависит, как мы видели, от „магнитной истории" вещества.

Принято величины B_{max}, B_r и H_c относить именно к устойчивому магнитному циклу, соответствующему изменениям магнитной силы в пределах от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$ и обратно.

§ 34. Гистерезисная петля как характеристика магнитного материала.

Форма гистерезисной петли весьма характерна для каждого данного материала. Как видно из сказанного выше, площадь, охватываемая кривой, зависит от величины остаточной магнитной индукции B_r и задерживающей силы H_c. Так как эти величины определяются свойствами материала, то совершенно ясно, что внешний

вид гистерезисной кривой в значительной степени характеризует тот материал, которому она соответствует. В качестве примера на рис. 75 приведены примеры кривых гистерезиса для мягкого железа и для закаленной углеродистой стали для одного и того же значения B_{max}.

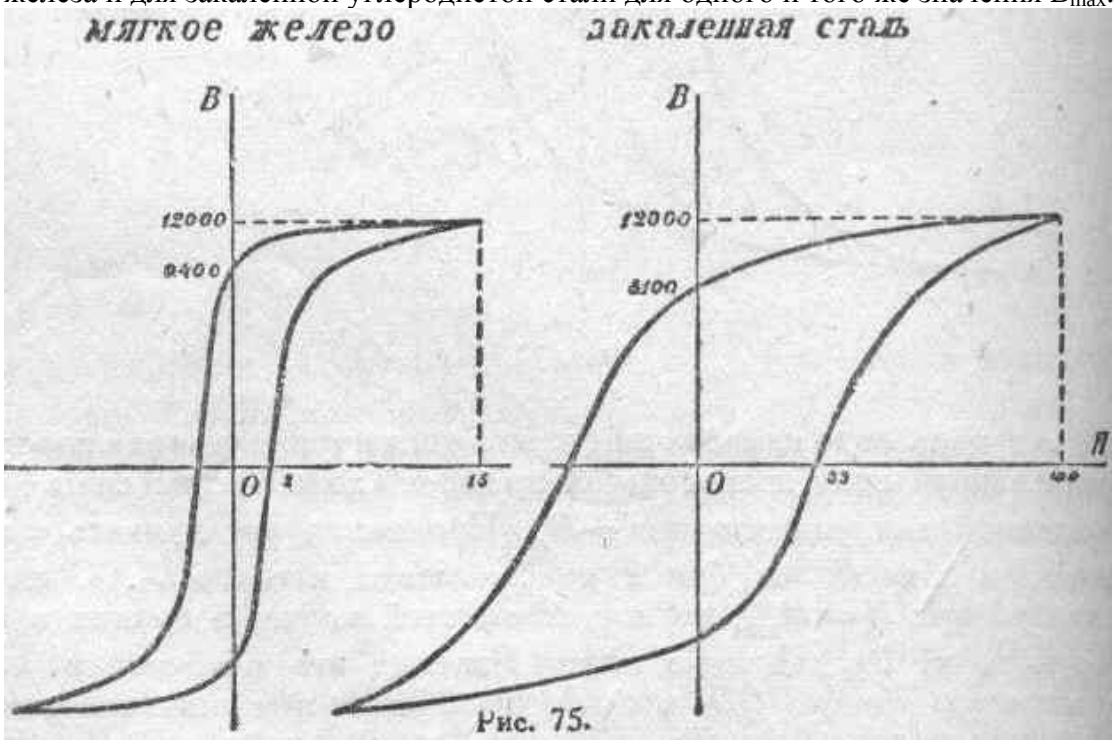


Рис. 75.

Железо обладает сравнительно весьма малой задерживающей силой H_c, вследствие чего остаточный ыагнитизм быстро исчезает при перемене направления намагничивающей силы. Гистерезисная петля в этом случае имеет узкую и вытянутую форму. У стали, наоборот, задерживающая сила очень велика, и кривая значительно расширена по оси абсцисс.

На рисунке 75 ясно выражается еще одно характерное различие между указанными материалами. При одной и той же максимальной индукции (B_{max}) сталь обладает хотя и меньшей величиной остаточного намагничения, но зато лучше его удерживает. Поэтому сталь и применяют при изготовлении постоянных магнитов, причем наиболее подходящими в этом отношении сортами стали являются те, у которых H_c имеет наибольшее значение.

Для характеристики устойчивости остаточного намагничения различных ферромагнитных материалов приводим ряд цифр, относящихся к магнитным циклам, проводимым в пределах от H=+500 до H = -500 эрстедов:

Железо (чистое)	H_c =	2,5	эрстедам.
Никкель	„ =	7,5	„
Кобальт	„ =	12	„
Сталь углеродистая (отпущ.)	„ =	23	„
Сталь углеродистая (закал.)	„ =	40	„
Сталь хромовая (2% Cr)	„ =	55	„
Сталь вольфрамовая (5% W)	„ =	65	„
Сталь кобальто-хромовая (15% Co) . .	„ =	220	„
Сталь кобальтовая (36% Co)	„ =	280	„

§ 35. Потери на гистерезис.

Прежде чем переходить к более подробному описанию магнитных свойств различных материалов с помощью рассмотренных вами кривых, необходимо остановиться на особом физическом смысле гистерезисной петли.

В главе I, посвященной магнитному потоку (см. § 20), было выведено выражение (15) для элементарной работы намагничения, рассчитанной на единицу объема намагничиваемого вещества:

$$dA_1 = \frac{1}{4\pi} HdB.$$

Остановимся сначала на разобранном уже в § 20 случае, когда индукция изменяется от $B_1=0$ до $B_2=B$ при $\mu=\text{const}$. Тогда работу намагничения на единицу объема можно представить так:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^B HdB = \frac{1}{4\pi\mu}\int_0^B BdB = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{1}{8\pi}\mu H^2 = \frac{1}{8\pi}HB,$$

так как при интегрировании μ, как величину постоянную, можно ввести под знак интеграла.

Графически зависимость $B=f(H)$ в этом случае изобразится прямой линией (рис. 76).

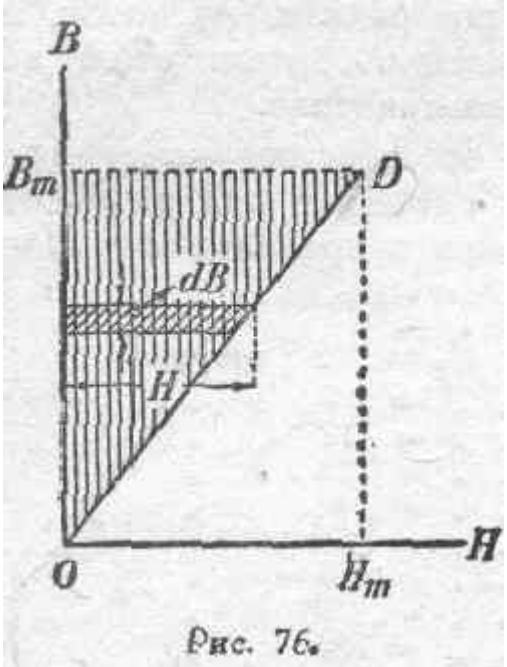


Рис. 76.

Найдем графически же величину A_1. Очевидно, HdB представляет собою поверхность элементарной площадки, (заштрихованной на рисунке), а следовательно, работа намагничения:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^B HdB$$

изобразится площадью треугольника ODB_m, разделенной на 4π. Это будет работа, запасенная в единице объёма намагниченного вещества при условии, если изменение магнитного состояния вещества не сопровождается никакими другими процессами энергетического характера. В таком случае запасенная энергия может быть целиком возвращена, например, в виде энергии индуктированного тока.

Перейдем теперь к рассмотрению более общего случая, когда $\mu \neq const$. В выражении

$$A_1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^B HdB$$

мы уже не имеем права ввести μ под знак интеграла. Аналитически взять этот интеграл *мы* в этом случае не можем, так как, вообще говоря, не знаем точной зависимости между B и H, но графически этот интеграл находится очень просто. Однако, как мы сейчас увидим, при этом уже нельзя утверждать, что вся затраченная работа превращается в энергию, запасенную в намагниченном веществе. Здесь особенно отчетливо выступает затрата работы на

внутренние процессы, происходящие при перемагничивании. О природе этих процессов мы будем говорить ниже.

На рисунке 77 изображена часть гистерезисной петли ODB_r, расположенная в первом квадранте.

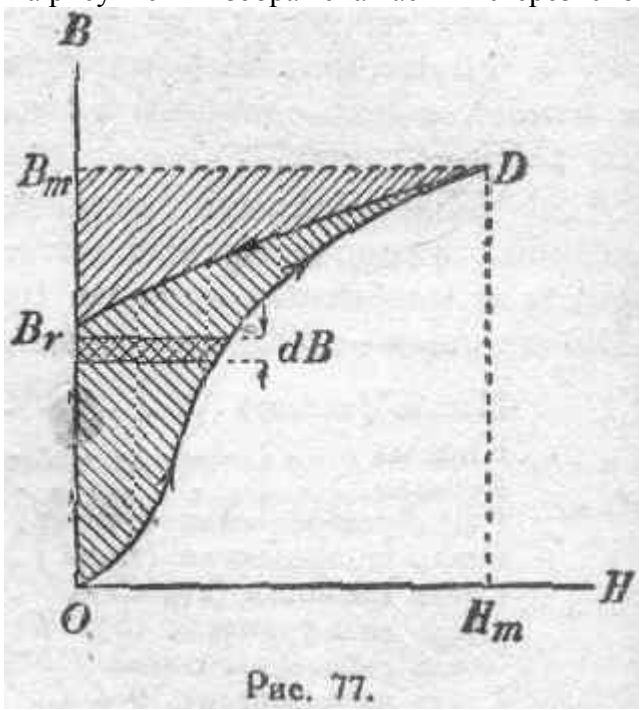


Рис. 77.

Найдем работу, затрачиваемую на намагничение в пределах от $B=0$ до $B=B_r$. На основании предыдущего можем написать:,

$$A_1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^{B_r} HdB = \frac{1}{4\pi}\left[\int_0^{B_m} HdB + \int_{B_m}^{B_r} HdB\right].$$

Величина первого интеграла

$$\int_0^{B_m} HdB$$

по существу нам уже известна (рис. 76): она изображается аналогичным образом, т. е. площадью, ограниченной с одной стороны кривою *OD*, а с другой стороны — прямой DB_m и осью ординат. При определении второго интеграла

$$\int_{B_m}^{B_r} HdB$$

мы получим отрицательное количество, так как при прохождении кривой намагничения от *D* до B_r мы имеем уменьшение индукции,. а следовательно, отрицательное приращение *dB* при положительных значениях *H*. Графически величина этого интеграла определится площадью верхней заштрихованной площадки DB_mB_r (рис. 77). Таким образом, величина A_1 изобразится в данном случае площадью ODB_r. Обозначив поверхность площадки ODB_r через s, мы можем, следовательно, сказать, что работа, затрачиваемая на намагничение единицы объема вещества в пределах от *B=0* до $B=B_r$, выражается величиной:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi} s.$$

Отсюда мы видим, что величина этой работы в случае ферромагнитных веществ зависит от формы кривой намагничения, т. е. от магнитных свойств Данного материала.

В рассмотренном нами случае мы не имеем замкнутого цикла намагничения, так как, хотя и в начале и в конце рассматриваемого процесса *H*=0, однако наличие остаточного намагничения показывает, что магнитные состояния не одинаковы. Поэтому мы еще не имеем возможности сказать, на что именно пошла затраченная работа, — только ли на, изменение магнитного состояния вещества или еще на что-нибудь иное. Чтобы иметь возможность сделать какие-либо заключения по этому поводу, необходимо про-

делать полный цикл перемагничивания, т. е. привести вещество в состояние, совершенно аналогичное начальному. Посмотрим, чему будет равна работа

$$A_1 = \frac{1}{4\pi} \oint HdB$$

для случая замкнутого гистерезисного цикла (рис. 7S). В этом случае мы можем написать:

$$A_1 = \frac{1}{4\pi} \oint HdB =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \left[\int_0^{B_m} HdB + \int_{B_m}^{B_r} HdB + \int_{B_r}^{0} HdB + \int_0^{-B_m} HdB + \right.$$

$$\left. + \int_{-B_m}^{-B_r} HdB + \int_{-B_r}^{0} HdB \right].$$

Первый и второй интегралы дадут в сумме площадку I; третий интеграл—площадку II; четвертый и пятый—площадку III; шестой—площадку IV. Таким образом, работа, затрачиваемая в 1 куб. сантиметре вещества на перемагничивание его при замкнутом цикле и выраженная в эргах, оказывается численно равной, разделенной на 4π площади гистерезисной петли, если, конечно, масштаб для H и B один и тот же и если H и B выражены в эрстедах и гауссах. В противном случае, очевидно, необходимо при расчетах ввести соответствующий коэффициент.

Так как, пройдя полный гистерезисный цикл, мы приходим к первоначальному магнитному состоянию вещества, то ясно, что произведенная работа затрачена не на изменение магнитного состояния вещества, а на что то другое. Опыт показывает, что перемагничиваемое

вещество нагревается.

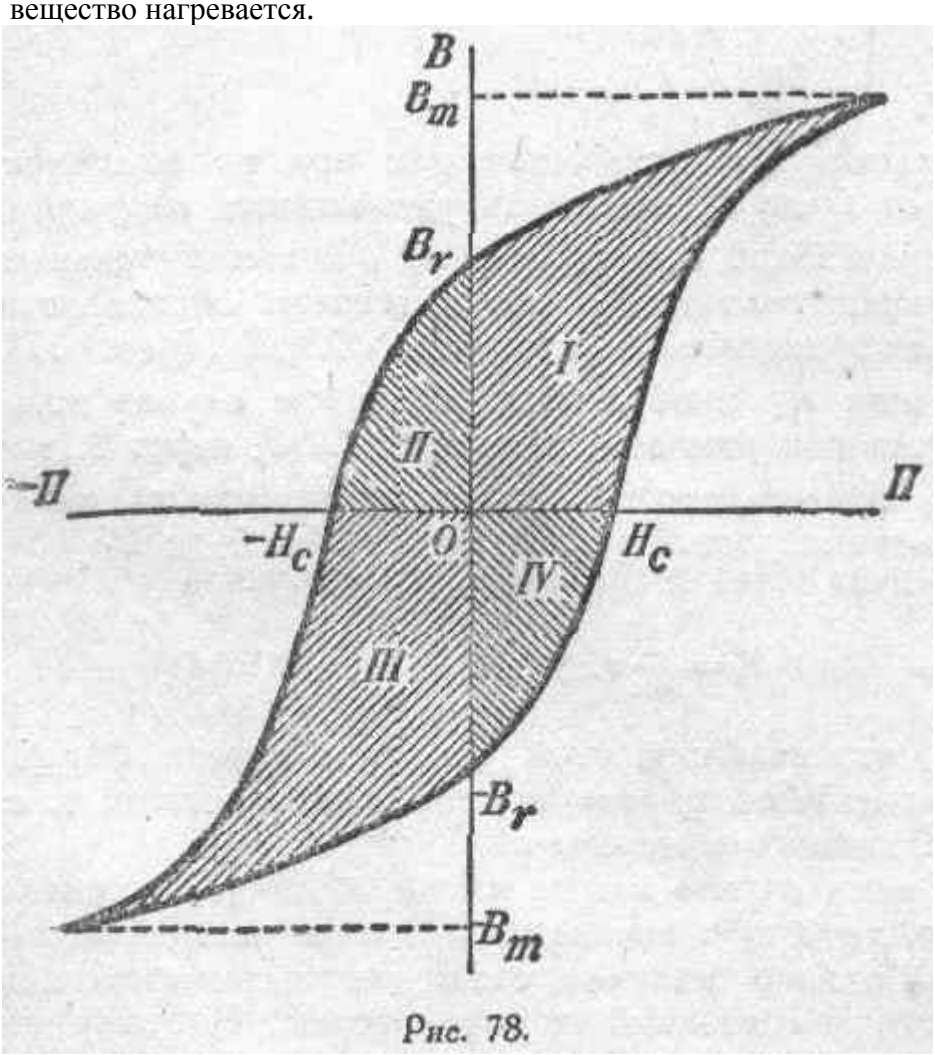


Рис. 78.

Можно предполагать, что затрачиваемая работа идет на преодоление каких-то сопротивлений, аналогичных силам внутреннего трения. Здесь имеет место нечто подобное нагреванию вещества в случае механических деформаций, переходящих за предел упругости его. Указанное обстоятельство — нагревание вещества от перемагничивания—имеет важное практическое значение, так как в целом ряде электромагнитных механизмов и аппаратов встречается непрерывное перемагничивание вещества (обычно железа и его сплавов), и, следовательно, имеет место *потеря энергии на гистерезис*. При расчете этих механизмов необходимо уметь предварительно учесть величину этих потерь, а также величину соответствующего нагревания, чтобы не получить недопустимого нагрева.

[1]) Во избежание недоразумений необходимо заметить, что потери на гистерезис имеют место не только при перемагничении по циклу, подобно изображенному на рис. 76, но и при всяком другом замкнутом цикле, хотя бы совершенно несимметричном, а также, вообще, при каком-угодно перемагничении, если только $\mu \neq const$.

§ 36. Расчет потерь на гистерезис и формула Штейнметца.

Вопрос о потерях на гистерезис в случае перемагничивания железа, стали, чугуна и т п. очень важен для электротехники, так как эти материалы играют существенную роль в магнитных цепях электромагнитных механизмов. Ввиду этого имеет не малое значение определение этих потерь путем расчета, а не только на основании непосредственного эксперимента. Это дает возможность принять во внимание эти потери, основываясь на геометрических размерах, проектируемых и еще не осуществленных механизмов, а также на задаваемых значениях B или H. Поэтому многочисленными исследователями был произведен ряд работ в этом направлении. Все эти работы, в конце концов, позволили по сводке опытных данных установить некоторые математические зависимости довольно точно,— а для обычной практики и более чем достаточно,— учитывающие и определяющие величину потерь на гистерезис. Штейнметц дал для симметричных циклов такую формулу

$$A_h = \eta B_m^n, \qquad (27)$$

где A_h представляет собою потери энергии на гистерезис, выраженные в эргах на 1 куб. сантиметр вещества и на один полный магнитный цикл, B_m есть наибольшее значение магнитной индукции в данном цикле, η представляет собою так называемый коэффициент Штейнметца и n — показатель степени, для которого Штейнметц дает

n=1,6.

Формула Штейнметца не была получена как вывод из каких-либо теоретических рассуждений. Она является чисто эмпириче-

ским соотношением, построенным так, чтобы возможно лучше соответствовать совокупности большого количества опытных данных. Предпринятые некоторыми исследователями работы по проверке формулы Штейнметца показали, что в общем для ферромагнитных материалов она дает довольно точные результаты и оказывается удовлетворительной для практических расчетов в пределах значений B_m, отвечающих приблизительно прямолинейной части основной кривой BH и местам перегиба на этой кривой, примерно до точек после второго колена, когда кривая вновь принимает прямолинейный характер. Для значений B_m, отвечающих областям кривой BH, лежащим далее второго колена, т. е. для сравнительно больших значений B_m (порядка от 16000 гауссов и выше), показателю n в формуле Штейнметца, повидимому, следует приписывать значение близкое к 2.

Во всяком случае, формула Штейнметца:

$$A_h = \eta B_m^{1,6}$$

остается в силе в качестве основного соотношения, пригодного для целого ряда электротехнических расчетов.

Что касается коэффициента η, то он имеет различные значения в зависимости от материала и изменяется, вообще говоря, в довольно широких пределах. В виде примера можно привести следующие данные:

	η
1. Железо (в зависимости от чистоты и термической обработки)	от 0,0010 до 0,0030
2. Трансформаторное железо кремнистое (от 2,5% до 4% Si)	от 0,0007 до 0,0010
3. Сталь углеродистая отпущенная	около 0,0080
4. Сталь углеродистая закаленная	„ 0,0250
5. Кобальт литой	„ 0,0100

Вообще говоря, величина коэффициента Штейнметца для одного и того же материала сильно изменяется в зависимости от механической и термической обработки. Холодная обработка (прокатка, удары и т. п.) увеличивает потери на гистерезис. Отжиг, ослабляющий внутренние напряжения в металле, уменьшает потери на гистерезис.

§ 37. Гипотеза вращающихся элементарных магнитов.

Рассмотренные выше явления гистерезиса, а также многие иные особенности поведения ферромагнитных материалов в случае их намагничения можно с большим правдоподобием объяснить изменениями в ориентировке элементарных частиц вещества, происходящими во время изменения магнитного состояния. Подобные объяснения исходят из некоторых предположений относительно строения магнитных материалов. На этой почве возникла так называе-

мая „гипотеза вращающихся элементарных магнитов", непосредственно вытекающая из идей Ампера, математически обработанная Вебером, затем дополненная Максвеллом, Юингом и другими.

По этой гипотезе магнитное тело представляет собою совокупность особых элементарных частиц, каждая из которых является как бы элементарным постоянным магнитом, так как она обладает противоположными полярностями на двух противоположных сторонах. Эти элементарные магниты подвижны около своих центров. Пока тело не подвержено намагничивающей силе, элементарные частицы своими магнитными осями расположены в теле по всевозможным и самым разнообразным направлениям. Вследствие такого хаотического распределения магнитных осей частиц тела, последнее, без особых внешних воздействий, само по себе не обнаруживает никаких магнитных свойств. Внешнее действие любого элементарного магнита вполне компенсируется действием соседних элементарных магнитов, оси которых направлены противоположно. Вообще говоря, внутри данного магнитного тела элементарные магниты образуют всевозможные комбинации и группировки, замкнутые внутри себя, т. е. так, что магнитные линии, исходящие из какого-либо элементарного магнита, замыкаются не через внешнее пространство, а через другие магниты той же группы. Поэтому вся масса данного магнитного тела, например, куска железа, вся эта сложная комбинация отдельных магнитных групп не обнаруживает видимого внешнего действия. Но стоит однако подвергнуть железо воздействию магнитного поля, создаваемого какою-либо внешнею причиною, как первоначальное хаотическое расположение элементарных магнитов тотчас же нарушается. Под влиянием поля магниты будут повертываться вокруг своих центров, стремясь расположиться по направлению магнитного поля. Поворот этот происходит так, что частицы располагаются, обращаясь одноименными концами их магнитных осей в одну и ту же сторону. Чем больше приближаются к параллельности между собою оси элементарных магнитов и чем ближе их направление к направлению поля, тем магнитные свойства тела начинают выявляться все сильнее и сильнее, тем сильнее „намагниченным" оказывается это тело. Однако, все эти элементарные магниты не расположатся сразу по одному направлению. Дело в том, что этому *будут* препятствовать силы взаимодействия между отдельными элементарными магнитами. Под действием внешнего магнитного поля последовательно и постепенно будут создаваться новые и новые комбинации этих магнитов, более или менее устойчивые. -При этих перекомбиниациях из всевозможных направлений элементарных магнитов все более и более будет выделяться направление, определяемое внешним магнитным полем. Таким образом железо „намагнитится", и при этом степень „намагничения" будет зависеть от силы внешнего магнитного поля. На куске железа обнаружатся „магнитные полюсы",

благодаря преимущественному теперь расположению молекулярных магнитов вдоль поля. Если мы, например, намагничиваем продольно
141

железную полосу, то на одном конце ее сгруппируется больше элементарных северных полюсов, а на другом конце соберется больше южных. Если мы будем еще более усиливать внешнее магнитное поле, то все большее количество магнитиков будет располагаться вдоль поля. В этом отношении должен наступить предел при некотором достаточно большом значении силы внешнего поля: в конце концов все элементарные магниты расположатся по направлению поля. Таким образом, мы путем теоретических рассуждений пришли к представлению о пределе намагничения железа, к представлению о „насыщении". Об этом состоянии вещества мы будем дальше говорить подробнее, пока же отметим, что вообще если детально разобрать все свойства, которыми должна обладать совокупность элементарных вращающихся магнитов, то мы найдем замечательное сходство со свойствами магнитных материалов.

Вскоре после того, как Вебер сформулировал впервые основные положения гипотезы вращающихся элементарных магнитов, Видеман и другие высказали предположение, что отклонению этих магнитов от их первоначального положения противодействуют некоторые силы, имеющие характер сил внутреннего трения. Наличием этих именно сил можно объяснить явления остаточного намагничения и гистерезиса, ибо действительно, если только такие силы существуют, то они будут удерживать элементарные магниты от возвращения в исходное положение, после того как прекратит свое действие или хотя бы только ослабеет внешнее магнитное поле. Однако, если бы частицы удерживались в определенной ориентировке силами, аналогичными силам обычного трения, то какой бы то ни было поворот их под действием некоторой внешней магнитной силы мог бы иметь место только в случае, если бы сила эта была достаточно велика, чтобы преодолеть трение. Другими словами, намагничение таких материалов, как железо, в очень слабых магнитных полях не должно было бы наблюдаться. Опыт не подтверждает этого заключения. Принимая во внимание все это и другие аналогичные обстоятельства, Юинг счел необходимым иначе представить себе механизм тех внутренних связей, которые в каждой стадии магнитного состояния вещества стремятся удерживать элементарные магниты в более или менее определенной ориентировке. По мнению Юинга, эти внутренние связи являются результатом взаимодействий элементарных магнитов, совершенно подобно тому, как будут взаимодействовать близ расположенные магнитные стрелки, могущие вращаться вокруг неподвижных центров.

Итак, по Юингу, всякий магнитный материал состоит из скопления элементарных магнитов, могущих вращаться вокруг своих осей, не встречая никаких сопротивлений, аналогичных трениям, со стороны соседних магнитов, но в то же время находящихся под магнитным контролем друг друга. Этот магнитный контроль можно понимать в смысле механического взаимодействия магнитных полюсов элементарных магнитов, разделенных между собой некоторыми конечными промежутками и непосредственно никогда не соприка-
142

сающихся. Нормальное хаотическое расположение этих магнитов в теле, не подверженном действию внешнего поля, следует понимать таким образом. Все магнитики, из которых состоит тело, сами собой разбиваются на ряд разнообразных, замкнутых внутри себя групп, обладающих относительною устойчивостью. При отклонении магнитиков из положения равновесия под влиянием внешних причин, эти группы могут не претерпевать существенных изменений в своем строении, и по прекращении внешних действий магнитики могут возвращаться в первоначальное положение. Однако, это должно иметь место только в том случае, если сила внешнего магнитного поля не превосходит известной величины, иными словами, пока магнитики не отклонятся дальше известного предела. При отклонении за этот предел хотя бы одного магнитика нарушается устойчивое состояние

группы, происходит внезапное перераспределение элементов, входящих в состав группы, и получается совсем иное расположение осей их, причем новое расположение элементарных магнитиков в группе является, как и прежнее, до известной степени устойчивым. Такого рода последовательные и внезапные разрушения одних устойчивых групп магнитиков и образование новых групп, более или менее устойчивых при новых условиях, при учете которых необходимо принимать во внимание и внешнее магнитное поле, происходит, по Юингу, во все время, когда усиливается намагничение данного тела.

Ясно, конечно, что пределом таких прерывчатых преобразований будет упомянутое выше состояние насыщения, при котором все обособленные группы элементарных магнитиков будут разрушены, и оси всех магнитиков расположатся параллельно направлению внешнего магнитного поля.

По Юингу, остаточное намагничение тела объясняется тем, что по прекращении действия намагничивающей силы элементарные магнитики, вообще говоря, приобретают группировки, отличающиеся от тех, которые были до намагничения, так как в рассматриваемом случае мы исходим из новых начальных условий. След от предшествовавшего воздействия со стороны внешнего магнитного поля выразится в том, что в новых, более или менее устойчивых группировках сохранится до некоторой степени преимущественное расположение осей магнитиков, соответствующее тому, которое было насильственно создано внешним полем.

Потери энергии при циклическом перемагничении, т. е. выделение тепла благодаря гистерезису, Юинг объясняет возбуждением колебаний элементарных магнитиков, когда при изменении намагничивающей силы магнитики в отдельных группах изменяют свою ориентировку и переходят из одного состояния устойчивого равновесия в другое. Энергия этих колебательных движений распределяется затем по всему объему намагничиваемого тела в форме приращения кинетической энергии молекул его и воспринимается, нами как тепловой эффект.

Юинг непосредственным опытом подтвердил справедливость своих основных предположений. Он изготовил большое количество

143

маленьких магнитных стрелок (рис. 79) и поместил их на отдельные вертикальные острия, расположив их в одной плоскости на столе так, чтобы при качаниях стрелки не задевали одна другую.

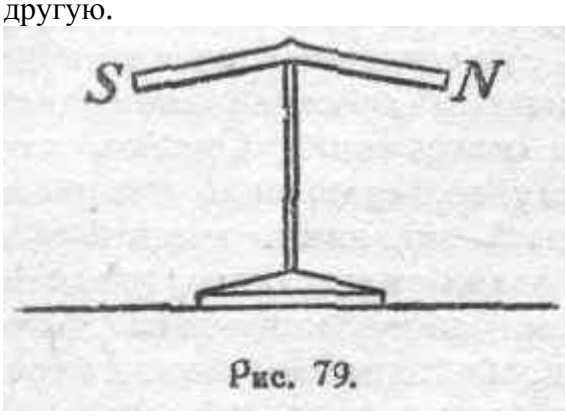


Рис. 79.

Различные группы таких магнитных стрелок Юинг подверг тщательному изучению. Он окружал систему стрелок несколькими вертикальными витками проволоки и пропускал по ней электрический ток. Надлежащим подбором силы этого тока и правильной ориентировкой витков можно было скомпенсировать действие земного магнитного поля на стрелки и наблюдать устойчивые конфигурации, которые образовывали собою стрелки, предоставленные самим себе. В виде примера на рис. 80 приведена группа из четырех таких стрелок, а на рис. 81 показаны четыре возможные состояния устойчивого равновесия группы из семи магнитных стрелок, так расположенных, что центры шести образуют правильный шестиугольник, а центр седьмой совпадает с центром этого шестиугольника.

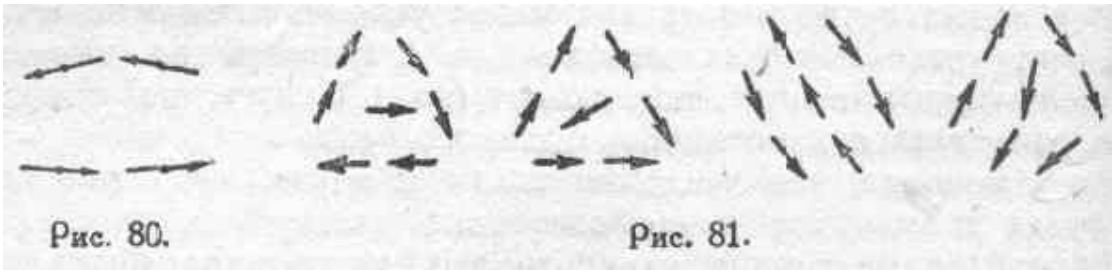


Рис. 80. Рис. 81.

На рис. 82 изображен применявшийся Юингом в этих опытах станок, в котором внешнее магнитное поле создавалось двумя катушками, расположенными по концам.

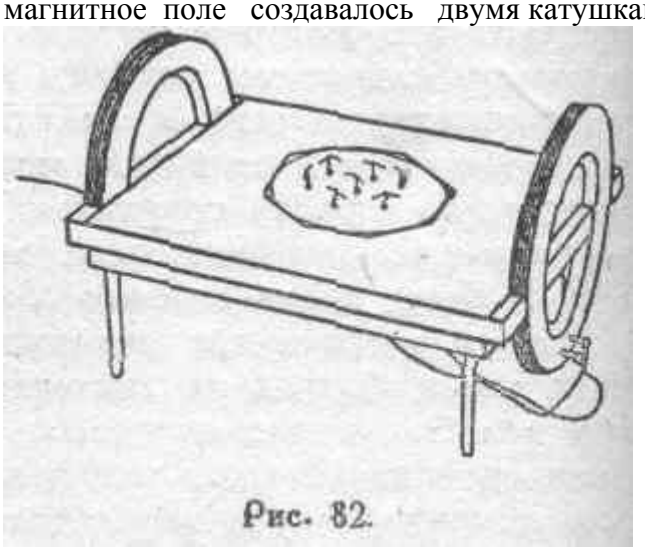


Рис. 82.

Стрелки помещались на горизонтальной доске станка в промежутке между катушками. Число отдельных магнитных стрелок, которое Юинг брал при изучении этих моделей магнитного тела, колебалось в широких пределах, доходя иногда до 130.

Модели этого рода позволили Юингу произвести самые разнообразные наблюдения. Характер приобретаемой группой стрелок полярности, когда внешняя магнитная сила нарастает или меняет направление, или вообще как-нибудь изменяется, в достаточной степени делается ясным при простом взгляде на расположение стрелок. Можно было, однако, производить и количественные наблюдения, применяя обычный магнитометр и принимая лишь при этом меры к тому, чтобы скомпенсировать

144

действие на магнитометр, происходящее непосредственно от катушек, „намагничивающих" модель магнитного тела, т. е. группу стрелок. С этой целью последовательно с этими катушками включалась особая катушка, компенсационная, которая так располагалась по другую сторону магнитометра, чтобы свести до нуля действие самих намагничивающих катушек. Таким образом, можно было подвергнуть группу магнитных стрелок циклическому процессу перемагнничения. Для этого было лишь необходимо соответственно изменять силу тока в намагничивающих катушках. Кривые намагничения, получаемые таким способом, в высокой степени подобны обычным кривым для железа и других ферромагнитных материалов. И чем больше взято отдельных магнитных стрелок для построения модели, тем плавнее получаемые кривые и тем больше можно усмотреть в них деталей, имеющих характер того, что в действительности наблюдается с железом. На рис. 83 изображена кривая, относящаяся к циклическому процессу, проведенному над группой в 24 стрелки.

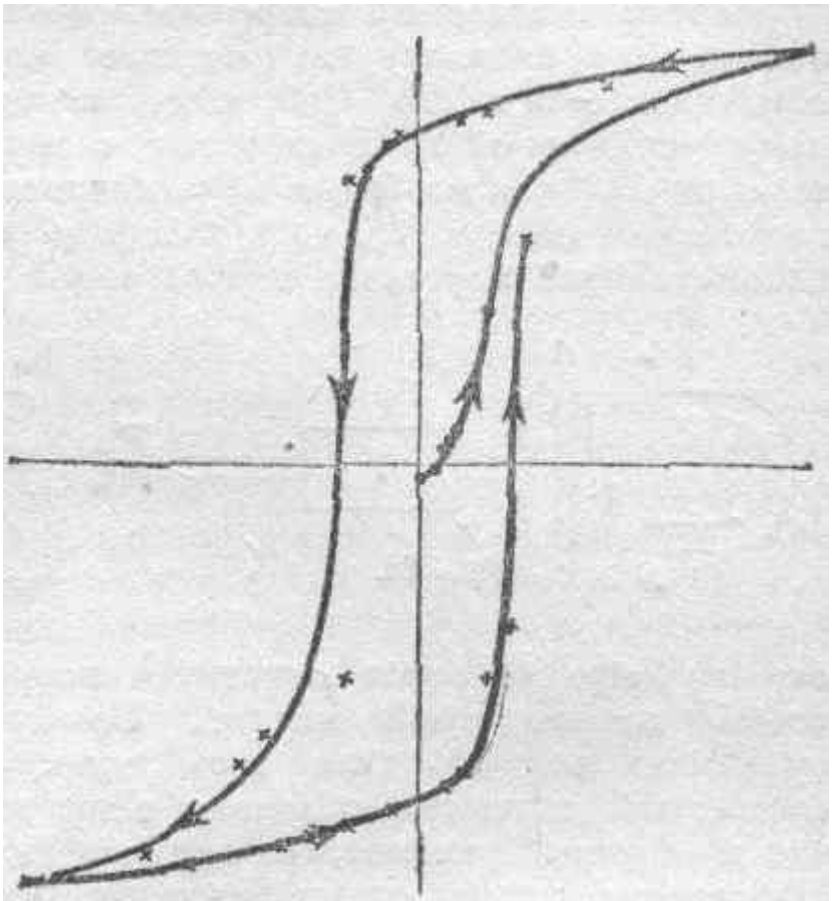


Рис. 83.

Сходство ее с аналогичными кривыми для ферромагнитных материалов поразительно.

Изучение всего того, что происходит с более или менее многочисленными группами магнитных стрелок, позволило Юингу, таким образом, прочно обосновать его теорию, гласящую, что элементарные магниты ферромагнитных материалов контролируются в отношении ориентировки их осей только теми силами, которые они взаимно оказывают друг на друга как магниты.

Форма комбинаций, образуемых осями магнитов, а также большая или меньшая устойчивость этих комбинаций, как показали опыты Юинга над различными системами магнитных стрелок, в значительной степени зависят от относительного расположения центров магнитов. Таким неодинаковым размещением центров элементарных магнитиков в разных телах Юинг объясняет наблюдаемое различие между магнитными свойствами тел.

В последнее время, благодаря развитию техники усилительных устройств *с* электронными лампами, явилась возможность объективно показать, что в реальных условиях при намагничении, например, железа все происходит, именно, так, как и следует ожидать

145

согласно теории Юинга, т. е. что при совершенно плавном возрастании намагничивающей силы магнитное состояние тела изменяется не плавно, а скачками, которые вызываются внезапными преобразованиями устойчивых группировок элементарных магнитиков. Конечно, в силу чрезвычайной малости этих магнитиков и большого числа их групп, входящих в состав железного стержня обычных размеров, скачки в магнитном состоянии относительно ничтожно слабы, но все же эти скачки действительно имеют место при всяком, на первый взгляд совершенно плавном, намагничении. Впервые удалось это показать Баркхаузену.

Опыт производится следующим образом (рис. 84).

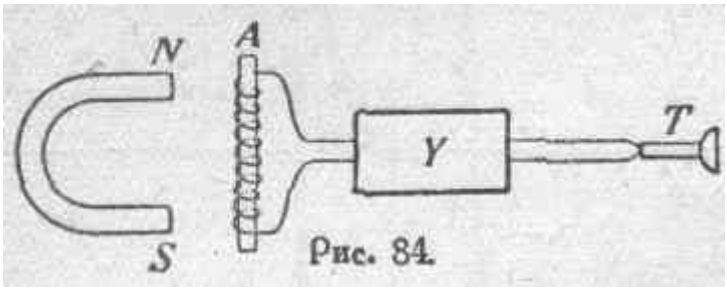


Рис. 84.

Перемагничиваемый стержень *A* (можно, например, взять обыкновенную проволочку из мягкого железа) помещается внутрь обмотки витков в 200 —300, концы которой присоединены к ламповому усилителю У, к которому с другой стороны присоединен телефон *T*. Если мы будем намагничивать стержень, поднося к нему постоянный магнит *NS*, то в телефоне услышим характерный шум, напоминающий хрустение перегибаемой оловянной пластинки. Если стержень *A* убрать из обмотки, шум прекращается. Смысл этого опыта совершенно ясен в связи с вышесказанным.

Если гипотеза элементарных магнитов может считаться весьма близкой к истине, то все же еще остается открытым вопрос: а что же представляет собою элементарный магнит? Во всех вышеизложенных рассуждениях мы обходили этот вопрос, считая лишь, что элементарный магнитик обладает теми же основными свойствами, что и обычный магнит, с которым мы имеем дело на опыте. Небезынтересно будет здесь указать, что Ампер, идеи которого по существу дали начало гипотезе вращающихся элементарных магнитов, на основании своих исследований в области электродинамики пришел к заключению, что каждая частица магнитного вещества обтекается замкнутым электрическим током. Ампер математически доказал, что такой „молекулярный" ток по всем своим внешним проявлениям совершенно эквивалентен элементарному постоянному магниту соответствующего размера.

Согласно теории Ампера, любой магнит, т. е. любое тело, приведенное в магнитное состояние, можно представить себе как комбинацию очень большого количества элементарных замкнутых электрических цепей, надлежащим образом ориентированных. По Амперу, в ненамагниченном теле распределение молекулярных токов совершенно хаотическое. При намагничивании тела плоскости этих токов повертываются около центров частиц, приближаясь к положению нормальному, к некоторому направлению, определяемому условиями намагничивания тела. Мы видим, таким образом, что по существу Ампер предвосхитил все, что в дальнейшем

146

говорилось о механизме намагничивания тела. Мало того. То, что установил Ампер, в полной мере оправдывается современными достижениями электронной теории строения атомов вещества. Согласно этой теории предполагается, что в состав каждого атома вещества входит некоторое количество электронов, находящихся в непрерывном движении, которое совершается по замкнутым орбитам, не выходящим, вообще говоря, за пределы объема атома. А ведь движущийся электрон, движущийся электрический заряд, есть, именно, электрический ток и не что иное. Таким образом, современная физика признает внутриатомные электрические токи как основное явление природы. Ампер говорил то же, но только он не имел достаточных опытных данных для того, чтобы углубиться в развитие своей основной идеи. Ампер мыслил по необходимости интегрально, рассматривая элементарную частицу магнитного вещества как некоторое физическое целое, обладающее магнитною полярностью благодаря наличию в нем электрического тока. Современная наука деталирует ато основное представление и показывает, что тот электромагнитный процесс, который происходит внутри каждого атома вещества, вообще состоит из целой совокупности замкнутых электронных токов. Расположением и числом электронных орбит внутри атома и их же расположением внутри молекул, являющихся комбинациями атомов, определяются в конце концов магнитные качества тех физических индивидуумов, которые мы с полным правом можем продолжать называть элементарными магнитами. Отметим вместе с тем еще следующее обстоятельство.

Современные представления о природе атомов вообще и о причине магнитности элементарных магнитов приводят нас к заключению, что добавочное магнитное состояние, привносимое наличием вещества, по существу своему не может ничем отличаться от того основного магнитного состояния среды, от того основного процесса, который имеет место в так называемой „пустоте" при возникновении в ней магнитного поля.

§ 38. Магнитное насыщение.

Итак, мы имеем достаточно данных признать, что гипотеза вращающихся элементарных магнитов вместе с вытекающей из нее юинговской моделью магнитного вещества может быть положена нами в основу наших представлений о внутреннем строении ферромагнитных материалов, и мы будем в дальнейшем пользоваться всеми вытекающими отсюда следствиями для того, чтобы углубиться в понимание различных явлений, наблюдаемых при намагничении вещества.

Остановимся прежде всего на упомянутом уже в предыдущем параграфе состоянии магнитного насыщения. Как было указано, гипотеза элементарных магнитов дает возможность предвидеть характер изменения магнитных свойств при значительном увеличении силы намагничивающего поля. Действительно, приняв эту гипотезу, мы придем к заключению, что интенсивность намагниче-

147

ния вещества I нельзя увеличивать беспредельно, так как, когда все элементарные магниты расположатся в направлении магнитной силы, дальнейшее увеличение этой магнитной силы уже не повлечет за собой никакого изменения в магнитном состоянии вещества. Таким образом, I имеет некоторый естественный предел I_{max}, при достижении которого мы будем иметь:

$$B = 4\pi I_{max} + \mu_0 H = \text{const} + \mu_0 H.$$

Следовательно, для больших значений H получаем:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{\text{const}}{H} + \mu_0,$$

и при увеличении H магнитная проницаемость стремится к пределу μ_0, численно равному единице.

Если мы обратимся к кривой, показанной на рис. 72, то увидим, что μ, сначала возрастая до некоторого предела, начинает затем падать. Полученный результат показывает что пределом этого падения будет:

$\mu_0=1$.

Заметим, что именно в силу этого обстоятельства при конструировании Электрических машин, вообще говоря, не выгодно брать слишком большие значения H или B, так как в этих условиях ста-

148

новится слишком малой роль ферромагнитного вещества в создании магнитного потока.

На рис. 85 рядом кривых показана зависимость между μ и B для разных материалов по мере приближения к насыщению.

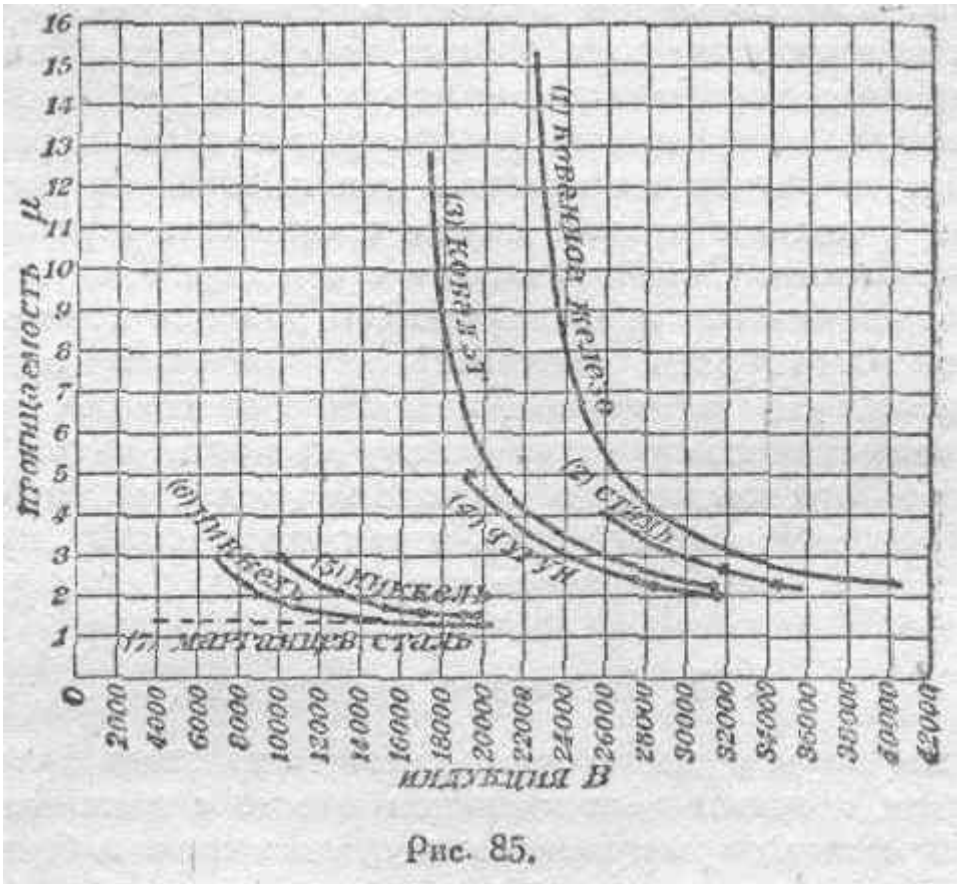


Рис. 85.

Здесь (1) — кованое железо, (2) — сталь, (3) — кобальт, (4) — чугун, (5) и (6) — никкель, (7) — марганцевая сталь. Во всех этих случаях, как показывают кривые, величина магнитной проницаемости, стремящаяся к 1 по мере возрастания магнитной индукции, действительно приближается к этому пределу.

§ 39. Влияние сотрясений на магнитные свойства.

Попытаемся теперь при помощи гипотезы элементарных магнитов объяснить влияние на магнитные свойства материалов некоторых внешних факторов, например, механических сотрясений, нагрева и т. д.

Разберем вопрос о сотрясениях, которым может подвергаться всякая магнитная система. С сотрясениями мы имеем дело на каждом шагу. В трансформаторах, под влиянием производимого переменным током перемагничивания, возникают колебания сердечников (вызывающие, кстати сказать, звуковой эффект — гудение железа сердечников). В электрических машинах сотрясения создаются механическими условиями, благодаря вращению и вибрациям, и это отражается на поведении материала магнитной цепи машины и т. д.

Из рассмотренной выше гипотезы элементарных магнитов должно быть ясно, что механическое сотрясение может способствовать перегруппировкам внутри вещества и что группы элементарных магнитов могут получить тот или иной вид в зависимости от внешних механических воздействий. Если, производя опыты на модели Юинга, постукивать по доске, на которой расположены магнитные стрелки, то характер кривой намагничения изменится в сторону уменьшения остаточного магнитизма. Таким образом, гипотеза элементарных магнитов дает нам возможность предсказать влияние механических сотрясений на поведение магнитного вещества.

Гопкинсон, желая обследовать влияние механических воздействий на процесс намагничения, взял стержень из отпущенного мягкого железа и поместил его в катушку, по которой пропускался

намагничивающий ток. Определяя величину индукции в железе с помощью баллистического гальванометра, Гопкинсон обнаружил, что всякий раз, когда в процессе намагничения стержня он ударял его о стол, гальванометр давал отброс, показывая таким образом приращение индукции. Таким образом, возрастание индукции шло не постепенно, а двумя этапами, увеличиваясь с увеличением H и делая скачок при ударе. При прохождении падающей ветви кривой гистерезиса сотрясение ускоряло процесс размагничивания. Для иллюстрации этих опытов приведем следующую таблицу.
149

H	B	
	До сотрясения	После сотрясения
0,25	400	6 400
1,70	7 000	11 300
3,40	11 800	12 800
7,80	13 700	14 100
16,50	14 300	14 500
7,20	14 300	12 800
1,70	12 200	11 200
0,20	11 100	7 000
0	6 900	около 0 после энергичных сотрясений

На рис. 86 приведена кривая намагничения, соответствующая вышеприведенной таблице.

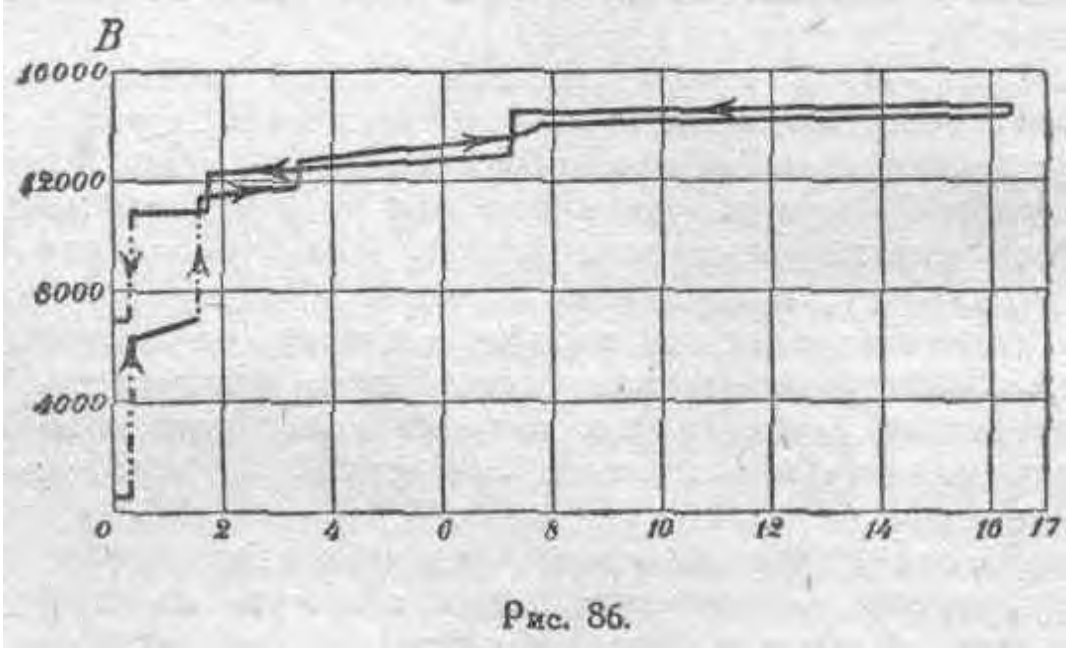


Рис. 86.

Как видно из таблицы и из кривой, влияние сотрясений особенно велико при сравнительно малых значениях магнитной силы. По мере приближения к условиям насыщения, влияние сотрясений становится все слабее и слабее. Так и должно быть. Действительно, в мощных магнитных полях ориентирующее влияние внешней магнитной силы достаточно велико для того, чтобы преодолеть внутренние связи в отдельных группах элементарных магнитиков и произвести те разрушения предшествовавших группировок, которые необходимы для создания новых группировок в процессе намагничивания. Совершенно иную картину мы можем наблюдать в слабых магнитных полях. Влияние поля может оказаться ниже того порога, за которым наступает внезапная перегруппировка данной комбинации элементарных магнитиков. Всякий новый фактор, способный как-либо поколебать основную конфигурацию магнитиков, может, присоединившись к ориентирую-

щему влиянию слабого магнитного поля, вызвать необходимую в процессе намагничения молекулярную катастрофу. При этом новая конфигурация магнитиков будет в значительной степени подчинена направляющему действию слабого магнитного поля, которое само по себе не могло произвести надлежащей перегруппировки. В этом случае все происходит совершенно подобно тому, что имеет место» когда мы посыпаем опилками картон для получения магнитного спектра магнита, помещенного под картон. В тех местах, где поле

магнита очень слабо и не может надлежащим образом ориентировать частицы опилков, будучи не в силах преодолеть трение последних

о картон, мы обычно помогаем вырисовыванию силовых линий, встряхивая опилки путем легких постукиваний по картону.

Влияние сотрясений на кривую намагничения проявляется, таким образом, в сближении восходящей и нисходящей ветвей кривой гистерезиса, и площадь гистерезисной петли, снятой **во** время сотрясений, получается весьма малой. Нельзя, однако, на основании этого делать общее заключение, что механические сотрясения уменьшают величину потерь на гистерезис, так как расход энергии на перемагничивание всецело определяется стационарной кривой. В случае же сотрясений этот расход покрывается не за счет намагничивающего тока, а за счет энергии механического деятеля, производящего сотрясения.

К тому же классу явлений можно отнести влияние частых перемагничиваний на магнитное состояние вещества. Можно считать, что цикл перемагничивания оказывает на элементарные магниты воздействие, до некоторой степени подобное действию механических сотрясений. Несомненно поэтому, что прохождение цикла должно сказываться на магнитной структуре вещества, содействуя переходу от одного расположения элементарных магнитов к другому. Этим обстоятельством пользуются, между прочим, для размагничивания материалов. С этою целью подвергают образец ряду последовательных перемагничиваний, уменьшая постепенно до нуля амплитуду магнитной силы (рис. 87), и таким путем достигают совершенного размагничивания материала.

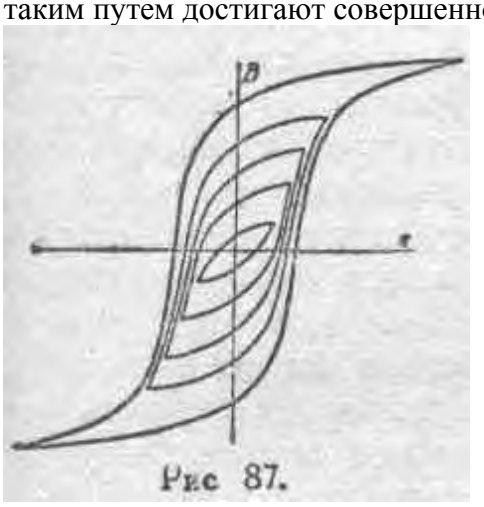


Рис 87.

Для получения наилучших результатов необходимо произвести такое размагничивание данного тела по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Отметим при этом одно
151

обстоятельство, находящееся в непосредственной связи с только-что сказанным. Именно, вершины непрерывно изменяющихся магнитных циклов лежат весьма близко к основной кривой намагничения (§ 33). Таким образом, эта основная кривая легко может быть построена. В действительности так ее и строят. * Такого же рода молекулярными сотрясениями иногда пользуются в технике изготовления постоянных магнитов. Постоянные магниты постепенно теряют частично свои магнитные свойства, при чем в первое время по изготовлении уменьшение остаточной индукции происходит довольно быстро. Для получения магнитов с устойчивыми магнитными свойствами необходимо выдерживать их некоторое время, и иногда выдерживали магниты годами. В последнее время для более быстрого достижения устойчивой остаточной индукции пользуются нагреванием магнита, которое ускоряет разрушение неустойчивых молекулярных группировок. Но еще проще получить тот же результат, подвергая магнит воздействию слабого переменного поля. Это проделывается следующим образом. Помещают магнит в станок с обмоткой, по которой проходит переменный ток. Силу переменного магнитного поля подбирают значительно меньшей силы того постоянного поля, при помощи которого произведено основное намагничение. Подвергая таким образом магнит легким молекулярным сотрясениям, можно уничтожить неустойчивую часть остаточной индукции, которая в противном случае исчезла бы со временем.

Подобная способность намагниченного материала терять часть остаточной индукции при воздействии слабого переменного поля использовалась между прочим в радиотехнике для конструирования так называемых магнитных детекторов. Принцип устройства такого детектора схематически изображен на рис. 88.

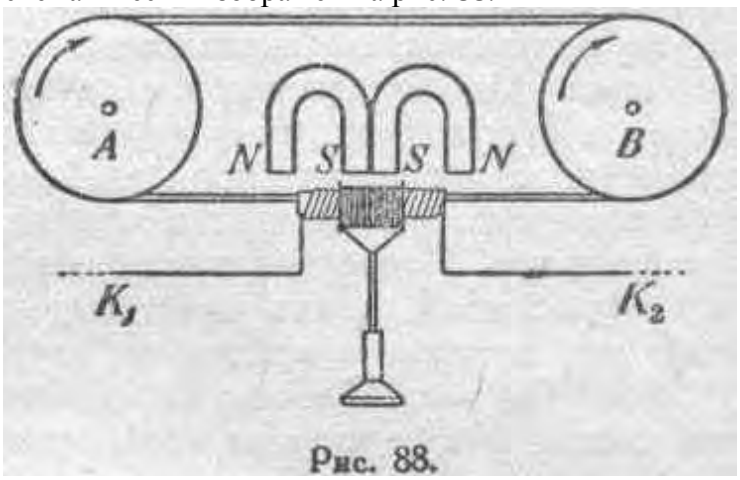


Рис. 88.

Бесконечный шнур из тонких железных проволок натянут на колеса *A* и *B* и движется при их вращении, проходя внутри катушки, включенной концами k_1 и k_2 в контур антенны. Около железного шнура помещены постоянные магниты. Намагничиваемый магнитами шнур попадает в катушку, где подвергается молекулярному сотрясению от токов высокой частоты, циркулирующих в антенне, и размагничивается. На изменение магнитного состояния шнура будет реагировать телефон, включенный в цепь второй катушки.

§ 40. Влияние температурных условий на магнитные свойства вещества.

Еще со времен Гильберта было известно, что железо и сталь теряют свои магнитные свойства, будучи нагреты до светло-красного каления. Они при этом перестают намагничиваться и не притягиваются магнитом, но при охлаждении восстанавливают свои обычные качества. То же происходит при несколько более высокой температуре с кобальтом и при более низкой — с

никкелем. Вообще говоря, переход от магнитного состояния к немагнитному происходит очень быстро, как только температура тела достигает определенного предела.
152

В виде примера приведем данные, которые были получены: Гопкинсоном во время одного опыта с куском кованого железа. Когда этот материал был подвергнут действию слабого магнитного поля (H=0,3 эрстеда), его магнитная проницаемость непрерывно возрастала с повышением температуры сначала медленно, затем все быстрее и быстрее и так далее, до предельной температуры, которая в описываемом случае оказалась равной 775° С. При этой температуре магнитная проницаемость во много раз больше, чем в случае холодного железа. При дальнейшем нагревании последовала чрезвычайно быстрая потеря магнитных свойств: когда температура поднялась всего только на 11°, т. е. до 786°С, железо сделалось практически немагнитным. Его магнитная проницаемость стала равной 1,1, между тем как при 775°С проницаемость имела значение около 11000. На рисунке 89) представлена графически зависимость μ от температуры в данном случае, т. е. при H=0,3 эрстеда.

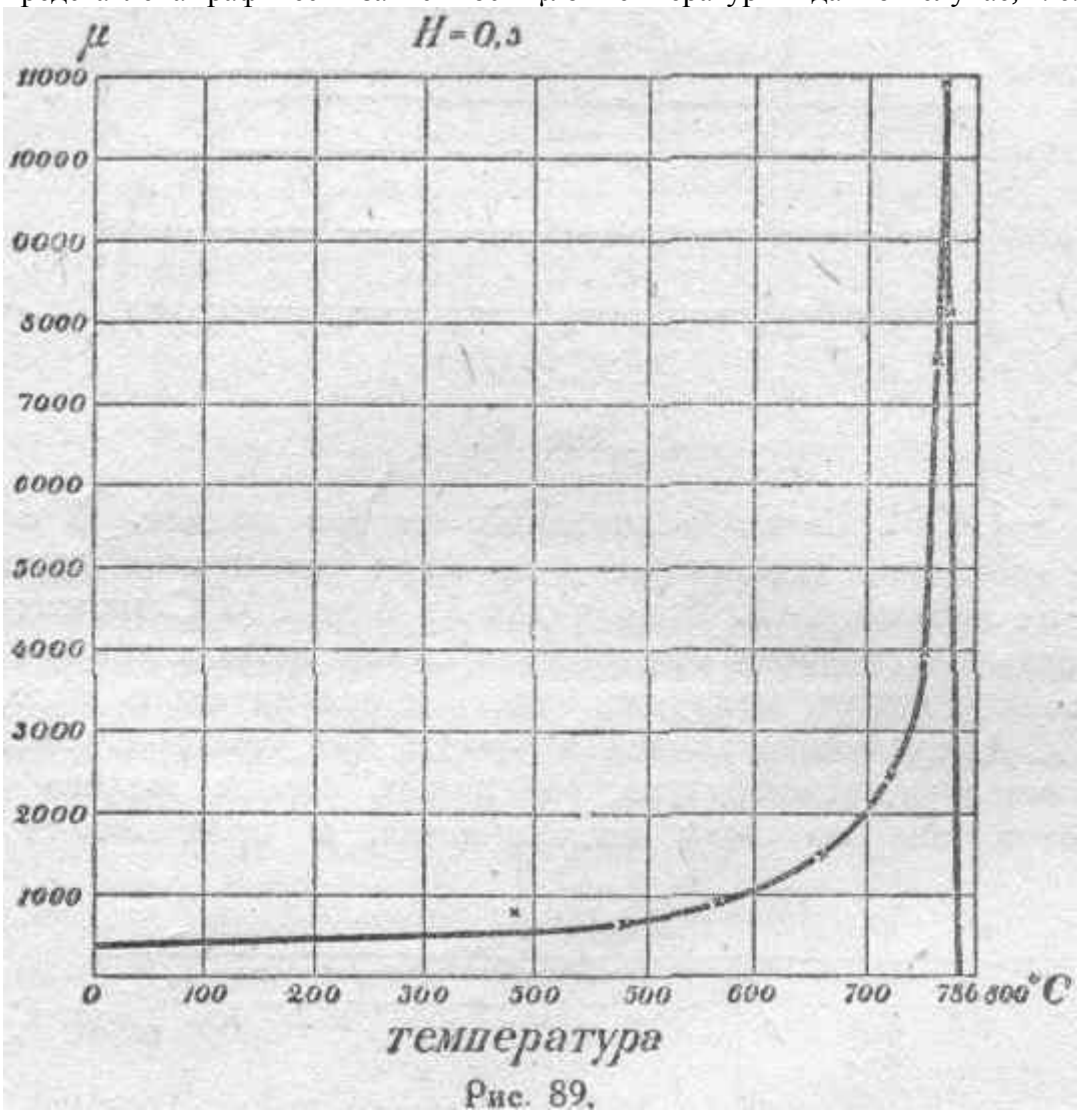


Рис. 89.

Здесь весьма отчетливо видно, насколько внезапно магнитная проницаемость данного образца железа падает при приближении температуры его к 786°С. Когда материал был подвергнут действию сравнительно более сильного поля, переход от магнитного состояния к немагнитному совершался более плавно, но потеря
153

магнитных свойств столь же полная, и происходит это при той же температуре, что и раньше. Гопкинсон назвал ее критической температурой. На рисунках 90 и 91 представлена зависимость μ от температуры при
H=4 эрстедам,
H=45 эрстедам,

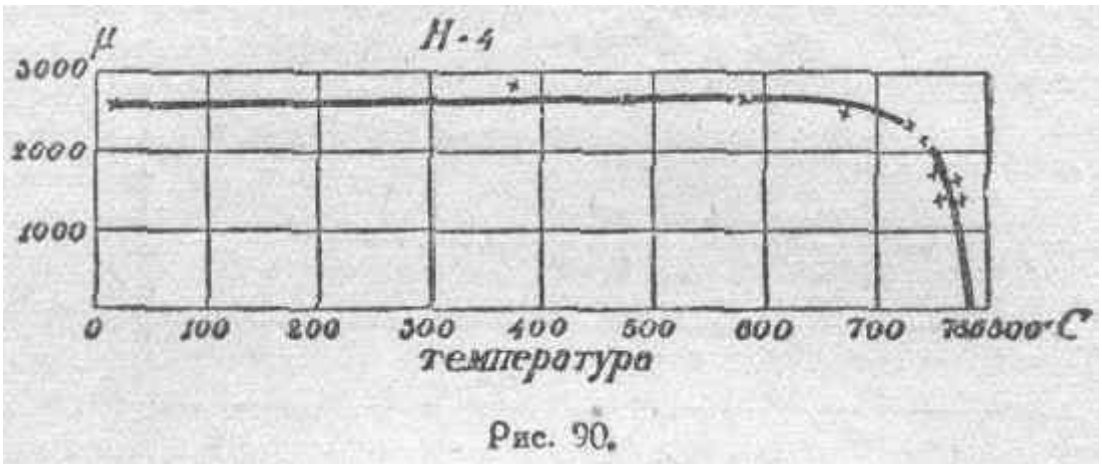


Рис. 90.

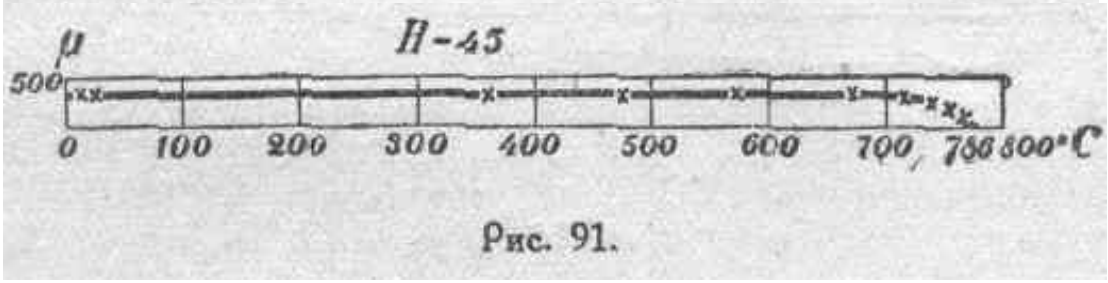


Рис. 91.

для того же сорта железа, к которому относится и рисунок 89. В случае *H*=4 эрстедам, по мере повышения температуры еще наблюдается некоторый подъем μ, и это продолжается приблизительно до 650°. Затем μ довольно быстро падает. В случае же *H*=45 эрстедам, повышения μ по мере повышения температуры совсем не наблюдается. В пределах от 0 до 500°С магнитная проницаемость практически сохраняется неизменною, а при дальнейшем нагревании начинает медленно падать и сравнительно медленно же падает до предельного значения μ=1,1 при температуре в 786° С. Критическая температура различных сортов железа и стали колеблется, как показали исследования, в пределах от 690° до 870°С. У кобальта критическая температура равна приблизительно 1000°, у никкеля —около 310°С.

Из приведенных на рисунках 89, 90 и 91 кривых ясно, что в пределах нормальных рабочих температур, встречающихся в обычной электротехнической практике, изменение магнитных свойств железа и стали в зависимости от нагревания настолько ничтожно, что при всякого рода расчетах им можно пренебречь.

На рисунке 92 приведены еще характерные кривые, представляющие результаты наблюдений Гопкинсона над ходом намагничения железа при разных температурах.

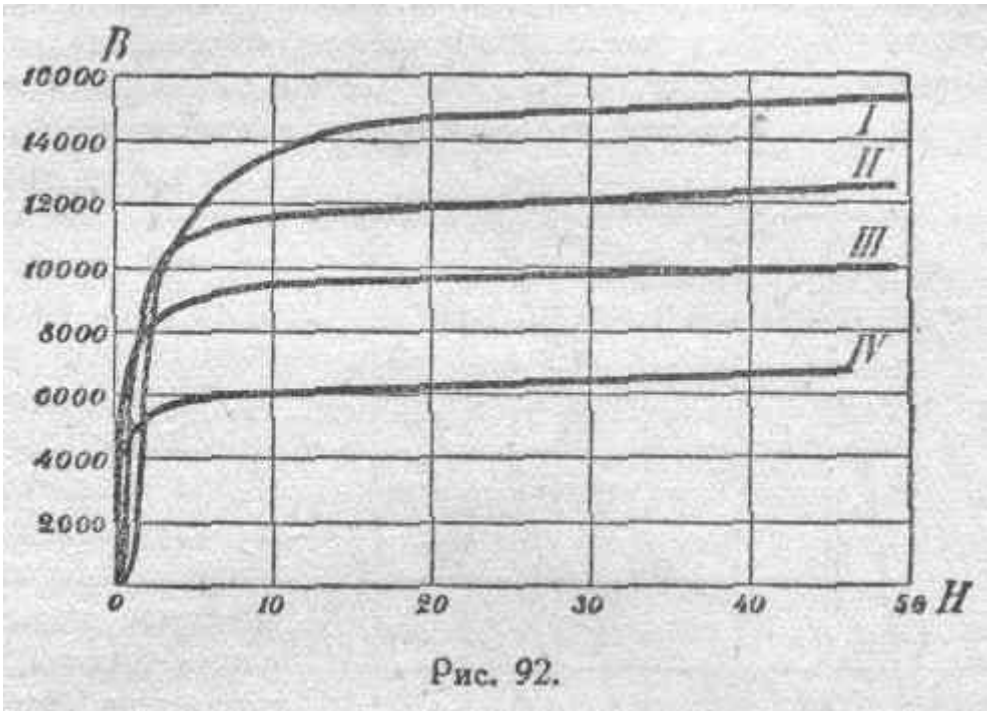


Рис. 92.

Здесь кривая I дает зависимость *B* от *H* при температуре в 10°. Кривая 11 дает ту же зависимость при температуре в 670°. Кривая III построена для
154

температуры около 742°, и, наконец, кривая IV — для температуры около 771°. На рисунке 93 представлены начальные части этих кривых.

Рис. 93.

Здесь масштаб *H* взят нарочно большим, чтобы наглядно показать относительное расположение кривых и их пересечение. Обозначения кривых те же, что и на рисунке 92.

Из всех приведенных кривых отчетливо видно, что чем слабее магнитное поле, воздействующее на железо, тем большее значение имеет повышение температуры в смысле достижения высших степеней намагничения. В этом отношении мы имеем полную аналогию с влиянием сотрясений на магнитные свойства ферромагнитных материалов (см. § 39). В данном случае гипотеза элементарных магнитов дает возможность высказать предположение, что с повышением температуры устойчивость отдельных групп магнитиков должна уменьшаться, так как при этом возрастает общая подвижность всех молекул тела. Надо полагать, что при приближении к критической температуре эта подвижность настолько уже велика, что достаточно небольших добавочных воздействий со стороны слабой

намагничивающей силы для того, чтобы нарушить исходные группировки молекулярных магнитиков и ориентировать их в направлении поля.
155

Есть много данных в пользу того предположения, что при переходе через критическую температуру железо *я* другие магнитные материалы вообще претерпевают какое-то резкое изменение в своих свойствах. Так, при переходе через критическую температуру резко меняются термо-электрические свойства, а также электрическое сопротивление материала. Далее, железо и сталь, предварительно нагретые выше критической температуры, при остывании темнеют до достижения этой температуры и затем внезапно вспыхивают, проходя через нее. Это последнее явление, открытое Барретом. было им названо *рекалесценцией*. Выяснилось, что температура рекалесценции как раз и есть температура критическая в магнитном отношении. Современная металлургия в полной мере выяснила сущность того, что происходит с железом и другими подобными материалами при переходе через критическую температуру. Именно, при этом происходит очень быстрое изменение молекулярного строения вещества, связанное с превращением одной модификации его (магнитной) в другую (немагнитную).
Кроме тех изменений магнитных качеств железа, которые обнаруживаются немедленно при повышении температуры его, на практике приходится встречаться еще с одним явлением, которое также повидимому обусловливается нагреванием. Речь идет о так называемом *старении железа*. Этот процесс протекает очень медленно при сравнительно низких температурах и выражается между прочим в изменении потерь на гистерезис, которые обычно возрастают с течением времени. Такое возрастание потерь на гисте-
156

резис в прежнее время нередко наблюдалось при работе трансформаторов переменного тока, для изготовления которых применялось простое железо. Есть основание полагать, что в данном случае мы имеем дело с медленным изменением молекулярного строения железа. Опыт показывает, что процесс старения ускоряется при нагревании. В частности при температурах порядка 150°—200° процесс этот протекает в несколько дней, в то время как при температурах порядка 50° он протекает годы, прежде чем железо придет в некоторое установившееся состояние. В связи с тем, что явление впервые было наблюдено *в* трансформаторах, сначала высказывалось предположение, что возрастание потерь на гистерезис представляет собою результат некоторой усталости материала, происходящей вследствие непрерывного перемагничивания, подобно усталости упругого тела, подверженного повторным механическим напряжениям. Юинг, однако, показал, что переменное намагничение само по себе не производит никакого действия. Мордей выяснил совершенно определенно, что возрастание потерь на гистерезис происходит исключительно благодаря длительному нагреванию материала. Это было затем подтверждено исследованием Роджета. Для иллюстрации сказанного выше о старении железа приведены на рисунке 94 кривые гистерезиса, полученные Роджетом для некоторого сорта железа при
B_{max}=4000 гауссов.

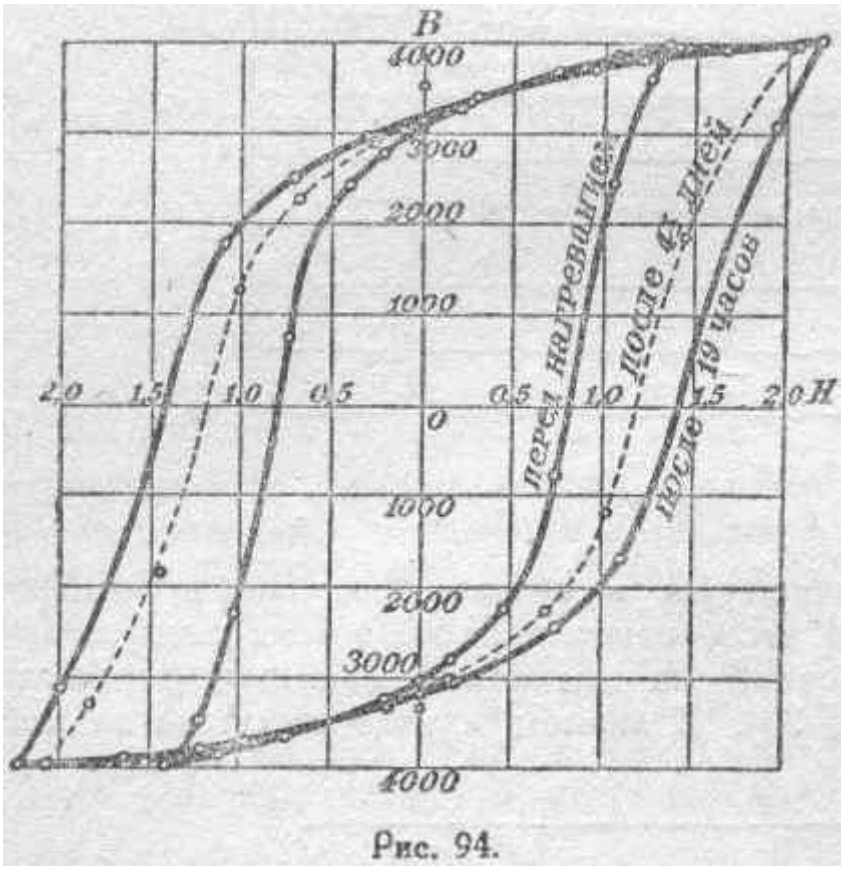


Рис. 94.

Здесь изображены три цикла. Первый характеризует железо в начальной стадии, т. е. до нагревания. Второй — через 19 часов нагревания при 200°. Третий цикл характеризует материал после нагревания при той же температуре в течение 4 дней. За это время был пройден максимум потерь на гистерезис.

В настоящее время в области электрического машиностроения и аппаратостроения вопрос о старении железа потерял свою остроту, благодаря тому, что удалось получить сплавы железа, обладающие весьма устойчивыми магнитными качествами (например, кремнистое железо).

§ 41. Магнитная вязкость.

С точки зрения гипотезы Ампера-Юинга мы рассматриваем всякий магнитный материал как совокупность элементарных магнитов. Процесс намагничения мы понимаем как изменение направления осей этих элементов. Такой процесс не может совершаться мгновенно, и можно заранее сказать, что должно существовать запаздывание во времени между изменением намагничивающей силы H и установлением соответствующего магнитного состояния вещества.

Опыт показывает, что действительно магнитная индукция не устанавливается мгновенно, а для установления ее всегда требуется некоторый промежуток времени. Это свойство ферромагнитных материалов называется магнитной вязкостью. Был поставлен ряд экспериментов по изучению магнитной вязкости, которые показали, что в сильных магнитных полях процесс установления магнитного состояния вещества проходит почти полностью практически мгновенно, и лишь очень малое приращение магнитной индукции происходит в дальнейшем с течением времени при условии H=const Это обстоятельство весьма существенно, так как во многих электромагнитных механизмах, работающих даже при повышенных частотах, мы, благодаря наличию, именно, сильных магнитных полей, можем практически не считаться с магнитной вязкостью. Наоборот, в слабых магнитных полях (например, порядка долей земного поля) процесс намагничения протекает довольно медленно, иногда затя-

157

гиваясь на несколько секунд и даже минут. Опыт далее показал, что мягкие сорта железа являются более вязкими в магнитном смысле, чем, например, твердая сталь.

В виде примера приведем результаты опытов Юинга по изучению магнитной вязкости мягкого железа, иллюстрируемые кривыми рисунков 95 и 96. Рисунок 95 показывает, что сначала процесс намагничения идет быстрее, а потом замедляется.

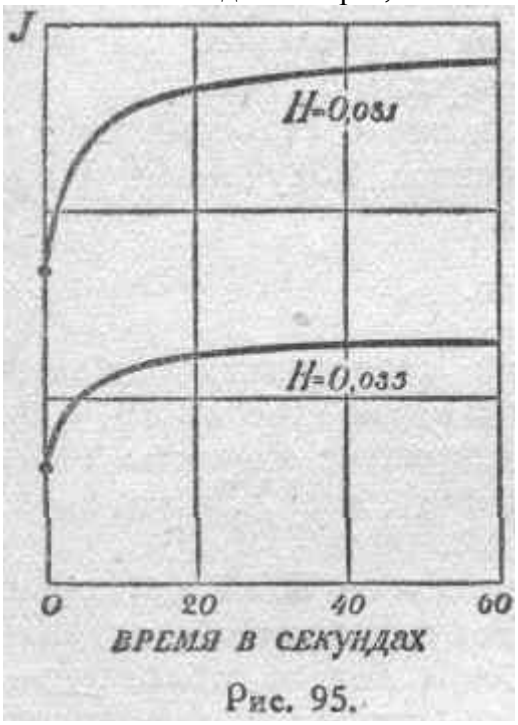


Рис. 95.

Из рис. 96 отчетливо видно, что через минуту напряженность намагничения значительно возрастает по сравнению с тем, что было в начальный момент.

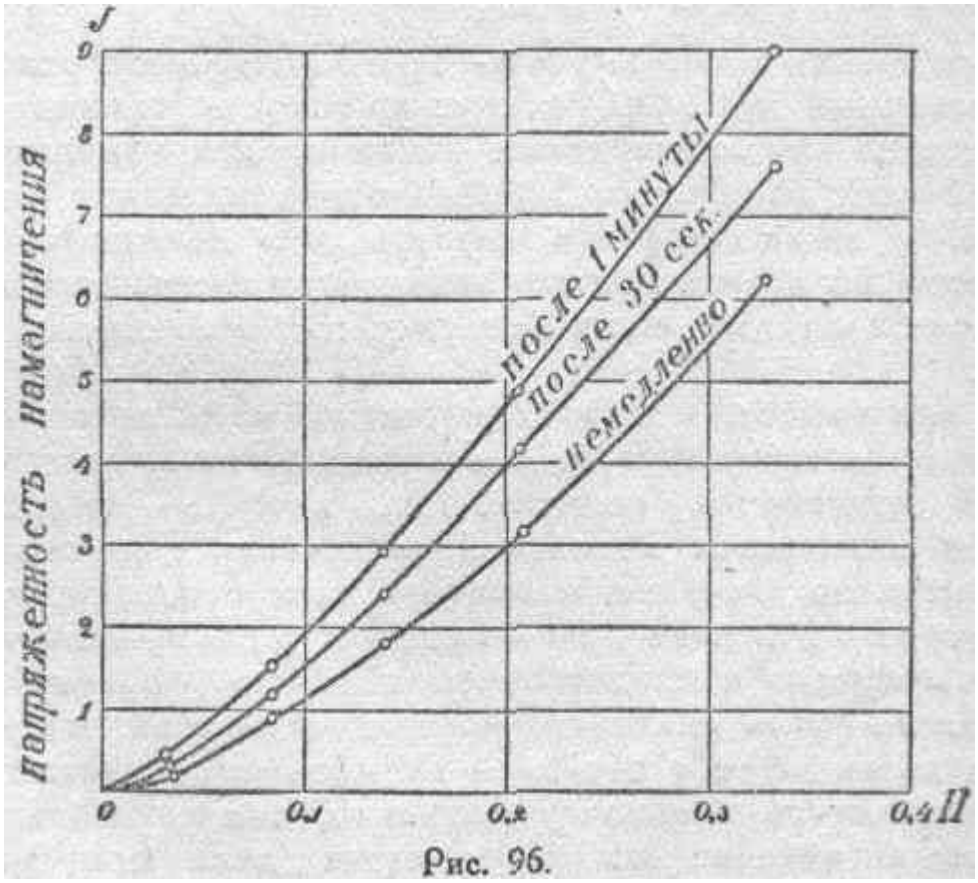


Рис. 96.

Результаты опытов Юинга приводят к заключению, что при исследовании магнитных свойств материалов в слабых магнитных полях обычный баллистический метод может быть допущен только с оговорками. Юинг, следуя примеру Релея, пользовался в ряде своих опытов магнитометром. Такой метод является безупречным. Ясно, конечно, что современный флюксметр в полной мере может обеспечивать правильность наблюдений при условии, что направляющая пара в нем практически равна нулю.

Итак, в сильных магнитных полях с явлением магнитной вязкости практически можно не считаться, но в механизмах, применяемых в технике слабых токов, пренебрегать явлением вязкости иногда не следует.

158

§ 42. Изменение размеров тел при намагничении.

Заранее можно предвидеть, что перегруппировки элементарных: магнитов при намагничении могут вызвать некоторые изменения. в размерах намагничиваемого тела. Опыт показывает, что подобное изменение размеров тела при намагничении действительно имеет место. Впервые это явление наблюдал Джоуль в 1848 году, обнаруживший удлинение железного стержня при намагничении его. Природа рассматриваемого явления, насколько мы ее понимаем, указывает, что изменение размеров может итти в обе стороны, т. е. мы можем получить как удлинение, так и укорочение. На практике, именно, и наблюдается то и другое. Изменения длины в общем весьма незначительны (порядка 10^{-7} длины). С возрастанием намагничивающей силы приращения длины иногда уменьшаются и, например, у железа и кобальта, меняют знак. Характер и интенсивность процесса различны для различных материалов. Зависимость между удлинением в направлении намагничивающей силы и самой намагничивающей силой для трех магнитных материалов: железа (Fe), никкеля (Ni) и кобальта (Co), показана графически на рисунке 97 на основании опытов Бидуэла.

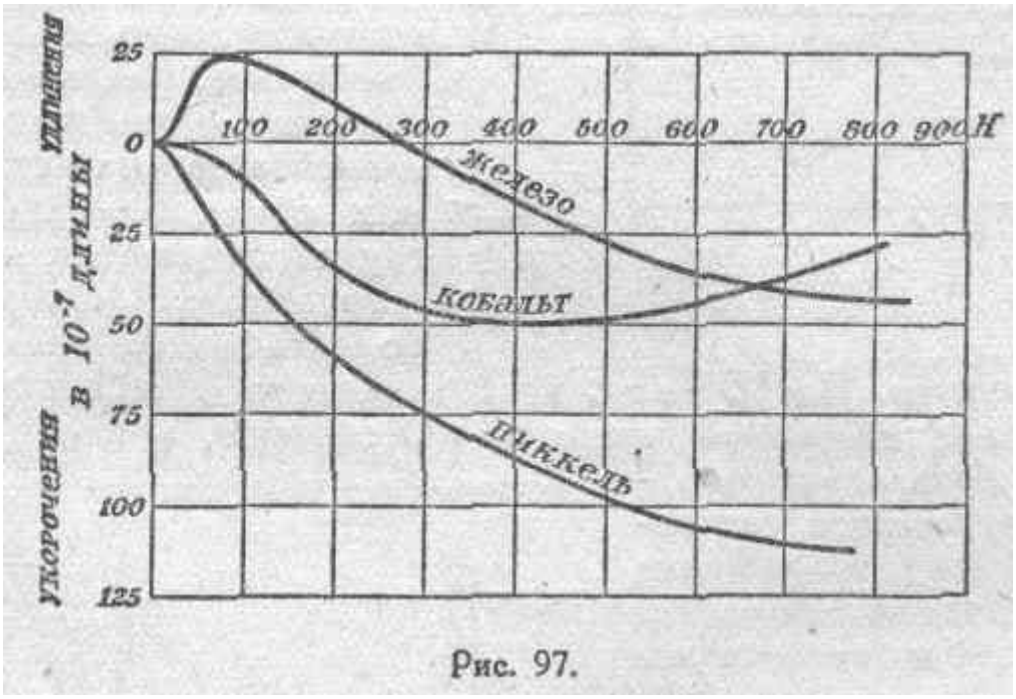


Рис. 97.

Из изображенных на этом рисунке кривых видно, что в практических пределах (для // от 0 до 250 эрстедов) железо удлиняется, тогда как никкель и кобальт укорачиваются, причем для Fe и Co изменения длины сравнительно незначительны. Изменения же в размерах для Ni несколько больше. Сталь меняет размеры подобно железу, только в меньшей степени. Изменение размеров тела при намагничении оказывается причиной некоторых явлений, к числу которых между прочим относится гудение трансформаторов и других приборов, работающих при переменном магнитном потоке. Железные листы сердечника трансформатора, подвергаемые переменному намагничению, периодически изменяют свои размеры и тем вызывают звуковые колебания. Надо только иметь в виду, что, кроме указанного обстоятельства, могут быть еще и другие причины гудения трансформаторов и т. п.

159

приборов, например, переменные механические взаимодействия между сердечником и обмоткой.

Отметим, что в изменениях размеров намагничиваемого тела наблюдается гистерезис. Впервые это явление было обнаружено Б. Л. Розингом.

§ 43. Гистерезис вращения.

Опыт показывает, что величина потерь на гистерезис, вообще говоря, зависит от того, каким, именно, образом происходит перемагничивание. Это явление довольно просто объясняется с точки зрения гипотезы элементарных магнитов. Вернемся к опытам Юинга (рис. 82) и рассмотрим сначала обыкновенное продольное перемагничивание. Несомненно, что при изменении величины *H* элементарные магниты (в данном опыте стрелки) перегруппировываются, и эти перегруппировки должны сопровождаться колебаниями элементов системы. По Юингу, колебания магнитиков и обусловливают переход магнитной энергии в тепловую, примем за счет деятеля, производящего изменение магнитного состояния, мы имеем возрастание кинетической энергии частиц вещества. Чем интенсивнее колебания магнитиков, тем больше потери на гистерезис. Чем плавнее совершается переход их из одной ориентация в другую, тем меньше потери. Может быть, именно, Этим обстоятельством и объясняется уменьшение потерь на гистерезис в мягком железе по сравнению со сталью. Представим себе теперь другой способ перемагничивания. Возьмем ту же юинговскую модель с магнитными стрелками и создадим сильное магнитное поле *H*. Стрелки

расположатся в определенном порядке, который в предельном случае очень сильного магнитного поля будет подобен тому, что изображено на рисунке 98.

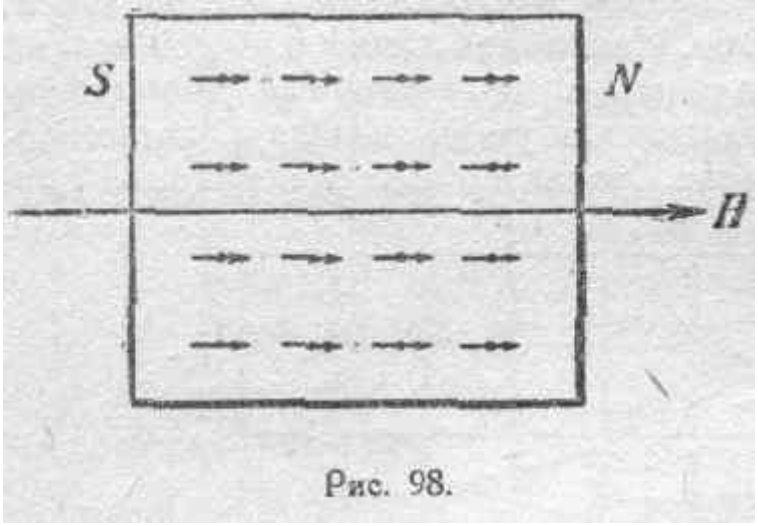


Рис. 98.

Начнем теперь вращать доску с магнитиками вокруг оси, перпендикулярной

доске, сохраняя при этом неизменное направление *n*. Магнитики вынуждены будут также вращаться вокруг своих центров, и при повороте доски на 180° мы будем иметь перемагничивание, т. е. поворот элементарных магнитов на 180°. Однако, в этом случае нет никаких оснований для каких бы то ни было перегруппировок для перехода через хаотическое состояние, так как перемагничиваемое тело все время находится в сильном магнитном поле. Таким образом, при перемагничивании вращением в достаточно сильном магнитном поле потери на гистерезис должны понизиться. В действительности это и имеет место. На рисунке 99 кривые изображают результаты опытов Бэйли по определению потерь на гистерезис при обычном переменном намагничении и при перемагничивании вращением.

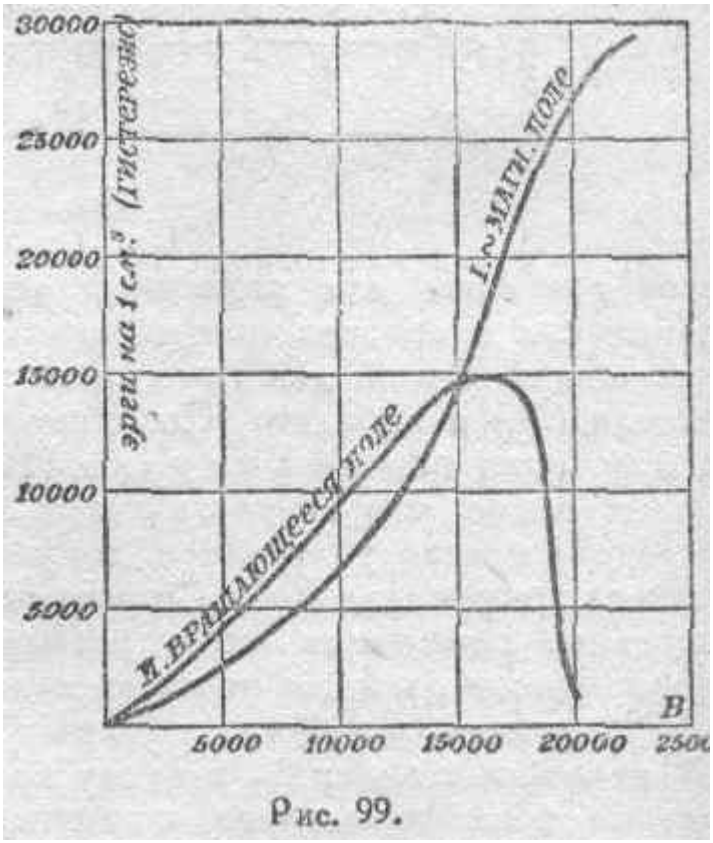


Рис. 99.

Кривые показывают, что в то время как при переменном намагничении потери на гистерезис непрерывно растут (кривая I), при перемагничивании вращением потери сначала (кривая II), при относительно малых значениях индукции *B*, возрастают даже быстрее, чем в первом случае, но по достижении больших значений магнитной индукции начинают резко падать, чего и должно было ожидать.

Как видно, точка перегиба кривой II лежит в области довольно высоких индукций (порядка 15000 гауссов).

На практике мы имеем перемагничивание вращением во многих механизмах, например, в некоторых частях динамомашин. Подсчитывая для подобных случаев потери на гистерезис и пользуясь притом обычными методами, мы нередко, повидимому, преувеличиваем эти потери.

§ 44. Некоторые магнитные свойства железа и его сплавов.

В заключение мы остановимся на некоторых магнитных свойствах железа и его сплавов. Вообще говоря, в обычной практике мы пока еще редко пользуемся железом в чистом виде, *а* применяем его соединения или сплавы. Наиболее часто встречающимися примесями являются углерод (C) и сера (S); от этих примесей избавиться чрезвычайно трудно.

За последние годы техника изготовления химически чистого железа начала развиваться. Для получения чистого металла железо электролитически раффинируют, а потом переплавляют в вакууме для освобождения от водорода и других газов. Полученное таким путем железо обладает очень ценными магнитными качествами, но пока сравнительно дорого. Нижеприведенные цифры потерь на гистерезис (в эргах на $см^3$, на 1 цикл) позволяют судить о качествах вакуумного железа.

В настоящее время в электротехнике наиболее широко применяются сплавы железа с кремнием (Si).

В нижеследующей таблице в виде примера того, что в этом случае может быть достигнуто, приведены величины потерь на

161

гистерезис для двух сортов кремнистого железа (сплав вакуум-железа с кремнием):

По данным:	Потери на гистерезис в эргах на 1 $см^3$, на 1 цикл	
	$B_m = 10\,000$	$B_m = 15\,000$
Гадфильда (1900 г.) Шведское железо	2700	5500
Енсена (1914—15 гг.) Вакуумное железо	813	1640

По данным Енсена	Потери на гистерезис в эргах на 1 $см^3$, на 1 цикл	
	$B_m = 10\,000$	$B_m = 15\,000$
Fe + 0,15% Si	286	916
Fe + 3,4% Si	280	1025

Величина потерь на гистерезис для сплавов Fe с Si резко колеблется с изменением содержания Si, как это иллюстрируется кривыми рисунка 100.

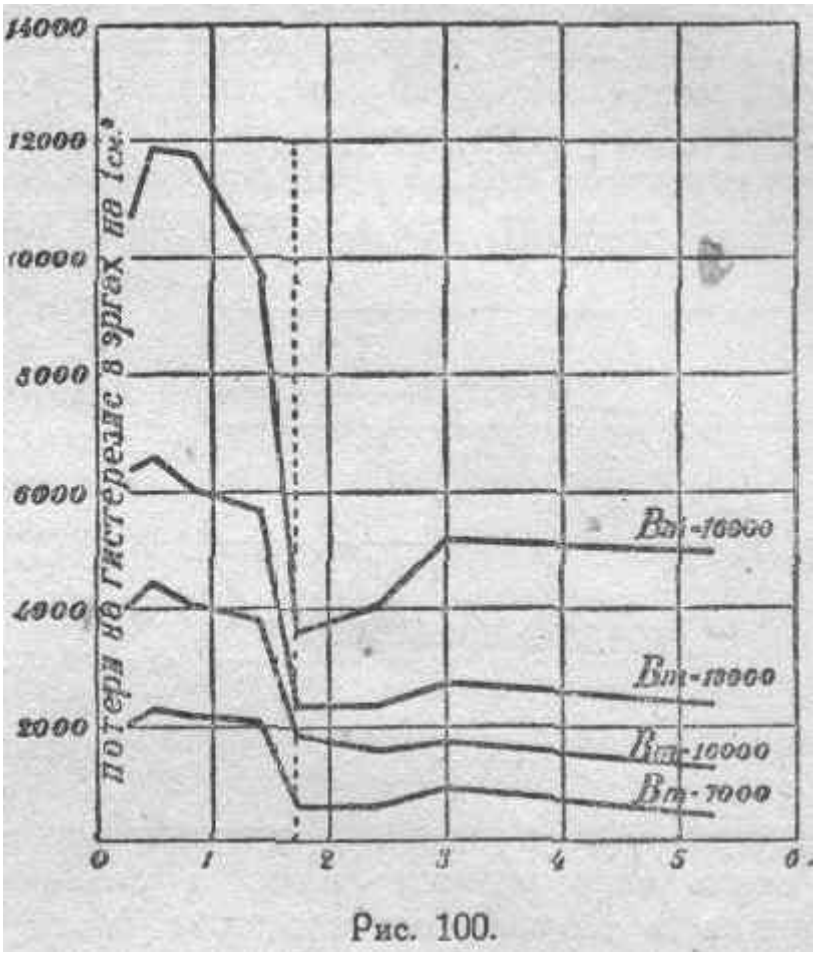


Рис. 100.

Эти данные относятся к сплавам обычного железа с кремнием. Из кривых видно также, что минимальными потерями на гистерезис обладает сплав с процентным содержанием кремния в 1,7%. Однако, на практике содержание кремния доводят нередко до 3,5—4% (трансформаторное железо), чтобы увеличить электрическое сопротивление железа и понизить потери на токи Фуко.

Зависимость между содержанием кремния и удельным сопротивлением показана в таблице:

162

% Si	Удельное сопротивление, омы на 1 *мм*² сеч. и 1 *м* длины	% Si	Удельное сопротивление, омы на 1 *мм*² сеч. и 1 *м* длины
0,001	0,09845	2,73	0,420
0,205	0,125	3,4	0,485
0,400	0,153	4,4	0,572
0,822	0,213	4,94	0,662

В настоящее время в электротехнической практике наиболее употребительны следующие сорта кремнистого железа: динамное. содержащее 1,7% Si, и трансформаторное, содержащее от 3,5 до 4% Si

Из других сплавов представляют особенный интерес сплавы железа с никкелем. Оба эти материала в отдельности обладают высокими магнитными качествами, в сплаве же железо и нвккель дают целый ряд материалов — от совершенно практически немагнитных до обладающих исключительно высокими магнитными свойствами. Сплавы эти отличаются еще одной особенностью. Именно, они в известных условиях обнаруживают весьма сильно выраженную неустойчивость своих магнитных свойств. Давно известная немагнитная сталь, имеющая состав

75% Fe+25% Ni, имеет при обычной температуре магнитную проницаемость μ=1,4. Охлажденная до -200°C она оказывается сильно магнитным материалом и при медленном нагревании может сохранить свою магнитность и при комнатной температуре. Однако, механические сотрясения опять приводят к прежней величине магнитной проницаемости μ=1,4. Аналогичная неустойчивость наблюдается и у некоторых сильно магнитных сплавов железа с никкелем, о чем скажем ниже.

Интересно проследить изменение магнитных свойств рассматриваемых сплавов при изменении содержания Ni. Характер изменения

показан на рисунке 101.

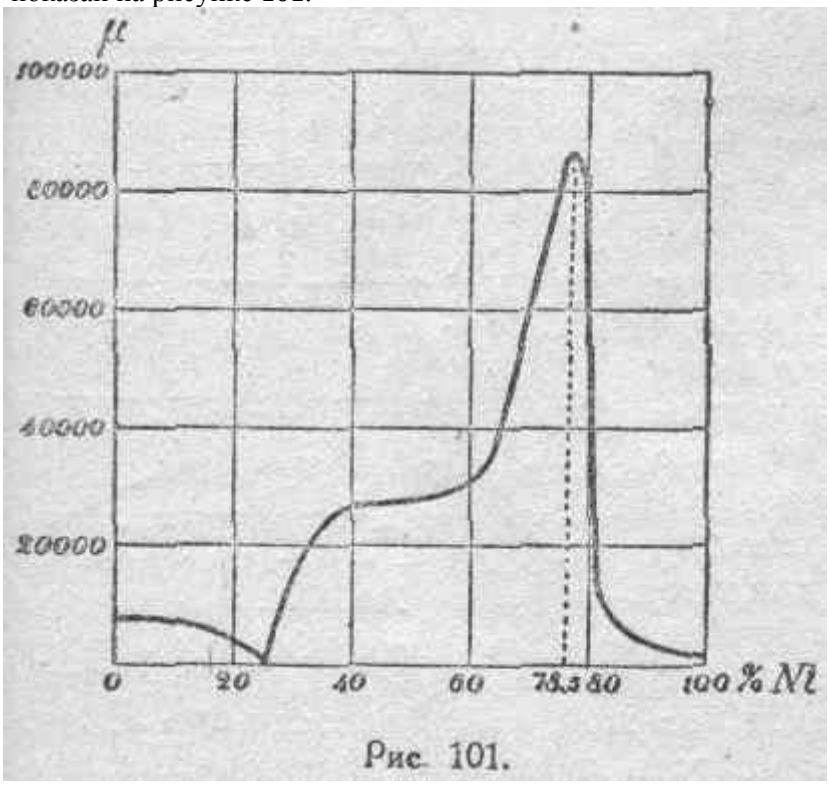


Рис. 101.

Здесь показана наибольшая магнитная проницаемость как функция процентного содержания никкеля. Из этой кривой видно, что в весьма узких пределах, около 78,5% никкеля, мы имеем резкое повышение магнитной проницаемости. Сплав в 78,5% Ni+21,5% Fe называется *пермаллоем*. Он обладает самой высокой магнитной проницаемостью из всех известных материалов. При H=0,06 гаусса μ доходит до 90000. Для сравнения свойств пермаллоя и мягкого железа приведены кривые на рисунках 102 и 103, из которых следует, что для получения одной и той же индукции в слабых полях пермаллой требует приблизительно в 20 раз меньшую намагничивающую силу.

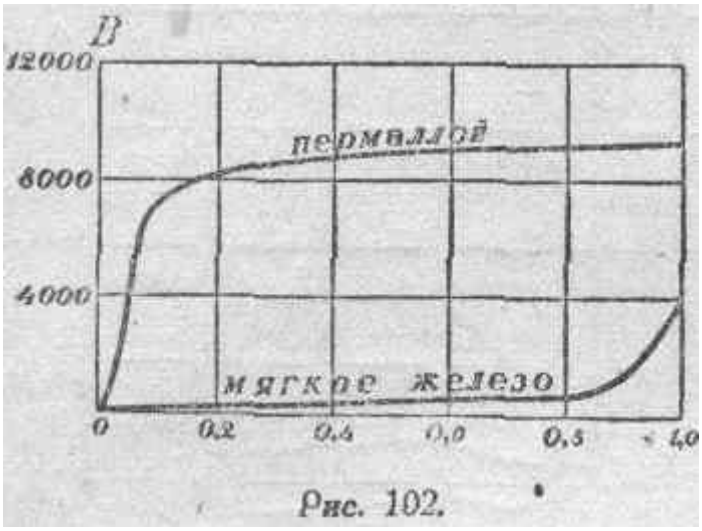


Рис. 102.

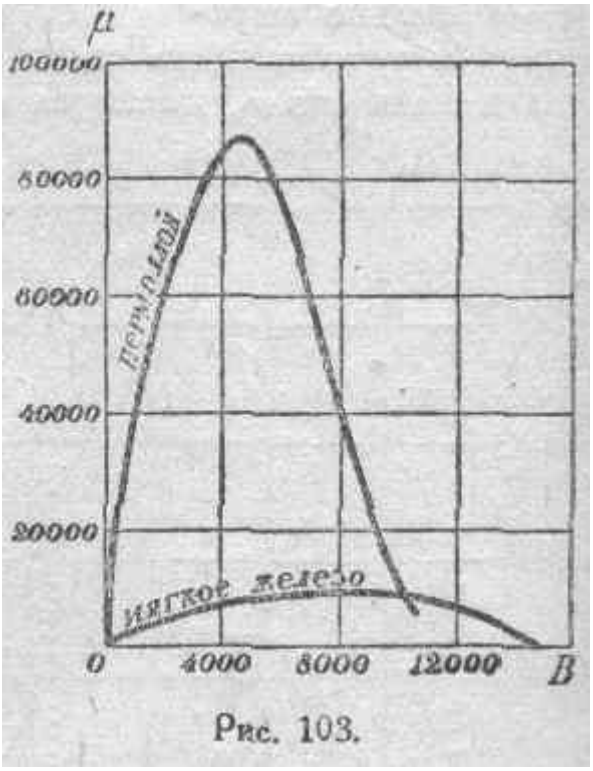


Рис. 103.

Однако, пермаллой быстро насыщается, и при больших индукциях проницаемость его ниже, чем у железа. Этим в значительной степени определяется область применений пермаллоя. Ясно, что он может оказаться полезным только в тех случаях, когда мы имеем дело с очень слабыми магнитными полями. Подобные условия очень часто имеют место в различных устройствах, встречающихся в технике слабого тока. Между прочим, ленты из пермаллоя с большим успехом применены были недавно для компенсации емкости подводных телеграфных кабелей по способу Крарупа. Как показывает опыт, для того чтобы пермаллой обладал надлежащими магнитными качествами, он должен быть подвергнут очень тщательной термической обработке. При этом необходимо еще иметь в виду, что высокие магнитные качества пермаллоя весьма неустойчивы, как было выше уже указано. Механические сотрясения или хотя бы только большие механические напряжения легко разрушают ту структуру пермаллоя, которая обладает ценными для техники свойствами. Таким образом, устройства, в которых применен пермаллой, требует очень внимательного к себе отношения и большой осторожности при работе с ними. Ввиду такой неустойчивости пермаллоя в некоторых случаях идут на некоторое понижение магнитных качеств, лишь бы иметь более стойкий материал. Так, например, в последнее время начинают применять сплав с составом 50% Fe+50% Ni.
164

ГЛАВА III Электрическое смещение.

§ 45. Общая характеристика электромагнитных процессов.

В предыдущих главах мы коснулись одной стороны электромагнитных явлений, а именно, рассмотрели некоторые общие свойства магнитного потока и магнитного поля. Теперь сосредоточим наше внимание на другой стороне этих явлений, имеющей отношение к тому, что мы называем электричеством.

Вся совокупность наших современных знаний свидетельствует о тесной связи между магнитными и электрическими явлениями. В настоящее время не подлежит никакому сомнению, что всякое магнитное поле, где бы и когда бы оно ни наблюдалось, неизменно сопровождается наличием движения электричества, т. е. электрокинетическим процессом, иными словами, электрическим током. Внутренний смысл закона магнитной цепи (§ 18) именно, и заключается в этом утверждении. Действительно, соотношение (12):

$\varphi = F/R$

гласит, что магнитный поток φ, рассматриваемый нами как основной процесс, происходящий в магнитном поле, может иметь конечное значение только тогда, когда магнитодвижущая сила *F* не равна нулю, ибо магнитное сопротивление R никогда не может быть бесконечно мало. Но магнитодвижущая сила есть по существу своему не что иное, как мера силы электрического тока, сцепляющегося с контуром рассматриваемого элементарного магнитного потока ср. Следовательно, если мы имеем магнитное поле, другими словами, если в данном пространстве существует магнитный поток, т. е. если $\varphi \neq 0$, то, хотя бы в части пространства, доступной нашему наблюдению, и не было никаких явных электрических токов, мы все же должны утверждать, что

$F \neq 0.$

165

Таким образом, в данном случае электрический ток обязательно где-либо должен существовать, сцепляясь при этом с контуром магнитного потока. Иногда магнитный поток может на некоторой доле своего протяжения проходить через части системы, не доступные нашему непосредственному обследованию, например, через тело постоянного магнита, или выходить далеко за пределы рассматриваемой системы. Поэтому нередко на опыте мы имеем дело с магнитным полем, связь которого с каким-либо электрическим током не бросается в глаза. Тем не менее эта связь всегда есть. Магнитного поля самого по себе, — магнитного поля, не имеющего никакого отношения к движению того, что мы называем электричеством,— мы не можем себе представить, и такового, повидимому, в природе не существует.

С другой стороны, если в магнитном поле происходит какое-либо изменение, которое с фарадеевской и максвелловской точек зрения можно понимать только как результат соответствующего перераспределения магнитного потока, т. е. как результат движения магнитных линий, то в пространстве, где происходит это движение, всегда и неизменно наблюдается возникновение электрического поля. При этом особенно важно отметить то обстоятельство, что в рассматриваемом случае возникновение электрического поля может наблюдаться и при полном отсутствии каких бы то ни было электрических зарядов, непосредственно связанных с этим полем.

Итак, мы видим, что существует обширный класс физических процессов, в которых магнитные явления и электрические явления должны быть рассматриваемы не обособленно, а как две стороны одного, по существу неделимого, сложного процесса, называемого, именно, по этой причине *электромагнитным*. То пространство, в котором одновременно обнаруживаются магнитное и электрическое поля, как необходимо сопровождающие друг друга проявления единого процесса, называется *электромагнитным полем*.

Есть некоторые основания предполагать, что и в тех случаях, когда нам кажется, будто мы имеем дело с чисто электрическим полем, как таковым, на самом деле существуют и элементы магнитного поля, только лишь недостаточно выявленные. Мы имеем в виду так называемое электростатическое поле, которое всегда наблюдается в пространстве, окружающем заряженное электрически тело. Но электрический заряд тела мы не можем в настоящее время мыслить иначе, как обусловленный существованием элементарных электрических зарядов, атомов электричества. Что касается атомов отрицательного электричества, электронов, то современный физический опыт знает их только в движении. Электроны, входящие в состав атома материи, совершают непрерывное движение по эллиптическим и круговым орбитам вокруг некоторого центра. Свободные электроны, являющиеся продуктами распада атомов материи или вырываемые из этих атомов благодаря каким-либо внешним воздействиям, наблюдаются нами на опыте только как электроны, движущиеся с большими или меньшими скоростями, но никогда — как электроны неподвижные. Таковые, повидимому, не существуют.

166

Атомы положительного электричества изучены в настоящее время менее, чем электроны. Из некоторых опытных исследований выяснилось, однако, что размеры элементарного положительного заряда— того же порядка, что и размеры электрона. Наблюдаемые на опыте атомы положительного электричества мы имеем опять же в движении. Обычно мы имеем с ними дело, в α-частицах, являющихся ядром атома гелия, связанным с двумя атомами положительного электричества. При этом необходимо отметить, что большие скорости α-частиц, выделяющихся при распаде атомов материи, свидетельствуют о том, что внутри атомов материи элементарные положительные заряды не находятся в покое. Вообще та структура, которую мы приписываем частицам любого материального тела, имеет кинетическую природу: элементарные электрические заряды как отрицательные, так и положительные необходимо мыслить находящимися в непрерывном движении того или иного характера. Ввиду этого совершенно естественно ожидать, что и избыточные заряды, положительные или отрицательные, сообщающие некоторому материальному телу явное электрическое состояние, т. е. обусловливающие его положительную или отрицательную электризацию и связанное с последней внешнее электрическое поле, вообще говоря, не остаются неподвижными на поверхности заряженного тела, а в большей или меньшей степени участвуют в том движении, которое совершают все элементарные электрические заряды, которые входят в состав тела. В таком случае всякое заряженное тело мы вправе рассматривать как очень сложную электромагнитную систему, в которой магнитное поле, в силу его внутримолекулярного характера, мы не в состоянии обнаружить извне обычными средствами, подобно тому как мы непосредственно не замечаем внутримолекулярных и внутриатомных электрических токов в веществе постоянного магнита. А между тем обычно мы рассуждаем так, как будто бы электрическое поле, наблюдаемое нами в пространстве, окружающем заряженные тела, не имеет никакой связи с каким-либо основным электромагнитным процессом. К сказанному можно добавить еще следующее. Хотя мы в настоящее время еще ничего определенного не знаем о том, что собою представляет атом электричества, какова его природа, однако, не исключена возможность того, что при ближайшем обследовании этого вопроса выяснится чисто электромагнитная природа электронов и атомов положительного электричества.

Серьезным доводом в пользу этого утверждения является возможность возникновения и существования электрического поля вне связи с каким бы то ни было электрическими зарядами, а как бы в результате движения магнитного потока. Пример подобного электрического поля мы имеем в процессе электромагнитного излучения, кванты которого представляют собою самостоятельные электромагнитные комплексы, не связанные, вообще говоря, с какими-либо зарядами. Весьма поэтому возможно, что и так называемый „элементарный электрический заряд" есть не что иное, как особый электромагнитный комплекс, так построенный, что связанное с ним

электрическое поле выявляется более отчетливо, чем другая сторона этого комплекса—магнитное поле. Повидимому, структура элементов „электрического заряда" сама по себе тесно связана с тем, что мы можем себе представить, как элемент магнитного потока.

Итак, насколько нам позволяет судить опыт и весь объем современных физических знаний, в природе не может быть совершенно самостоятельного магнитного поля как такового и электрического поля как такового. Вообще существует, как основное явление, электромагнитное поле. Только благодаря ограниченности наших органов восприятия и неспособности охватить все в целом, мы нередко обращаем внимание лишь на одну или другую сторону электромагнитного процесса. Нам бывает удобнее изучать порознь магнитные и электрические явления. Иногда они действительно кажутся нам вполне обособленными. Чистую условность такого деления следует всегда иметь в виду.

§ 46. Непрерывность электрического тока.

Насколько существенную роль в учении о магнитном поле играет принцип непрерывности магнитного потока, настолько же важен в учении об электрокинетических явлениях принцип непрерывности электрического тока.

Во многих случаях непрерывность или замкнутость электрического тока ясна сама собой, но иногда она не очевидна, и если исходить из обыденных представлений, то целый ряд цепей мог бы быть назван „разомкнутыми цепями". В таких случаях мы должны обратить внимание на то обстоятельство, что проводящие части, являющиеся как бы концами цепи, в совокупности с диэлектриком, находящимся между ними, представляют собою некоторую емкость, играющую существенную роль в образовании замкнутой цепи тока. На рис. 104 представлена такая якобы разомкнутая цепь, состоящая из источника электрической энергии *E* с присоединенными к его зажимам металлическими шарами *A к B*.

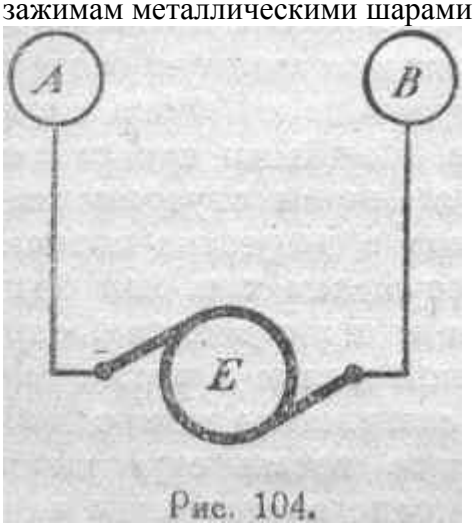


Рис. 104.

По существу же эта цепь замыкается через емкость между шарами *A* и *B*, и сила тока, который пойдет по этой цепи во время заряжения шаров *A и B*, зависит от этой емкости. Емкости, существующие между отдельными проводами Электрических установок, между жилой и броней кабеля, между антенной и землей, определяют собой величину силы зарядных электрических токов, замыкающихся через диэлектрик, в котором в процессе заряжения емкости возникает особое непрерывно изменяющееся электрическое состояние.

Заслуга установления принципа непрерывности электрического тока принадлежит Максвеллу. Он первый отчетливо осознал основные положения, данные Фарадеем, и ясно сформулировал самые общие свойства электрических цепей.

168

Для обоснования принципа замкнутости электрического тока Максвелл должен был углубиться в сущность процессов, происходящих в диэлектриках и на поверхностях раздела диэлектриков и проводников, в результате чего им была дана стройная картина вех явлений, связанных с диэлектриками.

§ 47. Электрическое смещение. Основные положения Максвелла.

Известно, что между заряженными телами создается электрическое поле. Это поле деформирует диэлектрик, приводит его в некоторое напряженное состояние, называемое обычно *электрической поляризацией*. Термин „поляризация" Максвелл определил как состояние, при котором „элементарный объем тела приобретает равные и противоположные свойства на двух противоположных сторонах".

Для дальнейшего изложения целесообразно обратиться непосредственно, к определениям и положениям, данным Максвеллом в его книге *Treatise on Electricity and Magnetism.* Приводим ряд выдержек из этого классического труда (§§ 60, 61 и 62):

„60. Электрическая поляризация элементарного объема диэлектрика есть вынужденное состояние, в которое среда приходит благодаря влиянию электродвижущей силы и которое исчезает, когда эта сила перестает действовать. Мы можем представить себе эту поляризацию в виде так называемого *электрического смещения*, производимого электрической силой. Когда

электродвижущая сила действует на проводящую среду, она производит ток сквозь нее, но если среда не проводит или средой служит диэлектрик, то ток не может длительно протекать сквозь эту среду, однако, электричество смещается в ней в направлении действия электрической силы, при чем величина этого смещения зависит от величины электрической силы, так что если последняя увеличивается или уменьшается, то электрическое смещение увеличивается или уменьшается в том же отношении".

„Величина смещения (в данной точке) измеряется количеством электричества, которое проходит сквозь единицу поверхности в то время, когда смещение изменяется от нуля до конечной величины. Это, таким образом, есть мера электрической поляризации".

„Аналогия между действием электрической силы, производящей электрическое смещение, и обычной механический силой, производящей (материальное) смещение в упругом теле, настолько очевидна, что я назвал отношение электрической силы к соответствующему электрическому смещению *коэффициентом электрической упругости среды*. Этот коэффициент различен для различных средин и изменяется обратно пропорционально диэлектрической постоянной каждой среды".

„Изменения электрического смещения, очевидно, представляют собою электрические токи. Однако, эти токи могут существовать только во время изменения смещения и поэтому не могут продолжаться неопределенно долго в одном направлении, как токи в про-

водниках, так как смещение не может превзойти некоторой предельной величины, не причинив разрывного разряда".

„Полное электрическое смещение изнутри наружу сквозь некоторую сферическую поверхность, концентрическую с (заряженным) шаром, равно заряду на этом шаре".

„Чтобы закрепить наши представления об электрическом смещении, предположим, что имеется конденсатор, образованный двумя проводящими пластинками *A* и *B*, разделенными слоем диэлектрика С. Пусть *W* есть проводящая проволока, соединяющая *A* и *B*, и предположим, что благодаря действию электродвижущей силы количество положительного электричества *Q* переносится по проволоке от *B* к *A*. Положительная электризация *A* и отрицательная *B* обусловливают определенную электродвижущую силу, действующую от *A* по направлению к *B* в слое диэлектрика, и эта электродвижущая сила произведет в диэлектрике электрическое смещение по направлению от *A* к *B*. Полная величина этого смещения, измеренная количеством электричества, вынужденного пройти сквозь некоторое воображаемое поперечное сечение диэлектрика, делящее его на два слоя, будет, согласно нашей теории, в точности равна *Q"*.

„Таким образом, выходит, что в то время, когда количество электричества *Q* переносится по проводнику под действием электродвижущей силы по направлению от *B* к *A* и проходит при этом сквозь каждое сечение проводника, то же самое количество электричества проходит через любое поперечное сечение диэлектрика от *A*

к B благодаря электрическому смещению. Движение электричества при разряде будет обратным. В проводнике количество электричества *Q* протечет от *A* к *B*, в диэлектрике деформация смещения

•будет ослабевать, и количество электричества *Q* пройдет через

каждое сечение диэлектрика от *B* к *A"*.

„Каждый случай заряда и разряда может быть поэтому рассматриваем как движение в замкнутом контуре, так что через любое сечение контура проходит в данный промежуток времени одно и то же количество электричества, и это имеет место не только в замкнутом проводниковом контуре, что было всегда общепризнано, но и в тех случаях, когда обычно считают, что электричество скопляется (аккумулируется) в определенных местах".

„61. Мы, таким образом, приходим к замечательному следствию, вытекающему из теории, которую развиваем, а именно, что движение электричества сходно с движением *несжимаемой*

жидкости, так что общее количество в воображаемой определенной замкнутой поверхности остается всегда одним и тем же. Этот результат на первый взгляд кажется стоящим в прямом противоречии с тем фактом, что мы можем, зарядив проводник, внести его в замкнутое пространство и таким образом изменить количество электричества в этом пространстве. Но мы должны вспомнить, что обычная теория не принимает во внимание электрического смещения в веществе диэлектрика, которое мы исследуем, но сосредоточивает внимание на электризации поверхностей, которыми граничат проводники с ди-
170

электриками. В случае проводника, заряженного, например, положительно, и если окружающий диэлектрик распространяется во все стороны за пределы замкнутой поверхности, — будет иметь место электрическая поляризация, сопровождаемая смещением изнутри наружу по всей замкнутой поверхности, и поверхностный интеграл электрического смещения, распространенный по всей поверхности, будет равен заряду проводника внутри поверхности".

„Таким образом, когда заряженный проводник вносится в замкнутое пространство, тотчас же возникает смещение количества электричества, равного заряду, сквозь ограничивающую поверхность изнутри наружу, при чем полное количество электричества внутри поверхности останется одним и тем же".

……
…...

„*62.* Основные черты теории таковы:

„Энергия электрического поля сосредоточена в диэлектрической среде, при чем безразлично, будет ли эта среда твердой, жидкой или газообразной, плотной или разреженной, или даже так называемой пустотой, только бы последняя была еще способна к передаче электрических действий".

„Энергия в любой части среды сохраняется в форме напряженного состояния, называемого электрической поляризацией, величина которой зависит от результирующей электрической силы в данном месте".

„Электродвижущая сила, действующая на диэлектрик, производит то, что мы назвали электрическим смещением, при чем соотношение между силой и смещением в самом общем случае принадлежит к классу явлений, которые должны быть в дальнейшем разобраны при исследовании проводимости, но в наиболее важных случаях смещение имеет то же направление, что и электрическая сила, и численно равно силе, умноженной на $1/4\pi K$, где K — диэлектрическая постоянная среды.

„Энергия на единицу объема диэлектрика, являющаяся следствием электрической поляризации, равна половине произведения электрической силы на электрическое смещение, умноженного, если это необходимо (в случаях среды неизотропной и неоднородной), на косинус угла между их направлениями".

„В жидких диэлектриках электрическая поляризация сопровождается тяжением в направлении линий индукция, сопровождаемым равным давлением по всем направлениям, перпендикулярным к линиям индукции, при чем тяжение или давление на единицу поверхности численно равно энергии на единицу объема в том же самом месте".

„Поверхность любого элементарного объема диэлектрика, который можно представить подразделенным на части, должна рассматриваться заряженной так, что поверхностная плотность в любой точке
171

этой поверхности равна величине электрического смещения сквозь этот элемент поверхности в *направлении внутренней нормали.* Если смещение произведено в положительном направлении,

поверхность элементарного объема будет заряжена отрицательно на положительной стороне этого объема и положительно на отрицательной стороне. Эти поверхностные заряды в общем будут уничтожать проявления друг друга, когда элементарные объемы непрерывно следуют один за другим, за исключением случаев, когда диэлектрик имеет внутренний заряд, или когда мы имеем дело с поверхностью, ограничивающей данный диэлектрик".

„Что бы ни представляло собою электричество и как бы мы ни понимали движение электричества, явление, которое мы назвали электрическим смещением, есть движение электричества в том же смысле, как и перенос определенного количества электричества по проводу представляет собой движение электричества; различие только в том, что в диэлектрике имеет место сила так называемой электрической упругости, которая действует против электрического смещения и принуждает электричество двигаться обратно, когда электродвижущая сила перестает действовать; в то же время в проводнике электрическая упругость непрерывно уступает под действием электродвижущей силы, так что возникает действительно проводниковый ток, и сила сопротивления зависит не от общего количества электричества, смешенного из его состояния равновесия, но от количества, которое проходит сквозь сечение проводника за данный промежуток времени".

„Во всех случаях движение электричества подчиняется тем же условиям, как и движение несжимаемой жидкости, именно в любой промежуток времени из замкнутой поверхности должно вытекать как раз столько, сколько будет вводиться внутрь поверхности. Из этого следует, что *каждый электрический ток должен образовывать замкнутую цепь*".

Приведенные выдержки ясно и точно формулируют все основные положения максвелловского учения об электрическом поле и явлениях, связанных с ним, и теперь нам остается только подробнее рассмотреть эти положения в той мере, которая определяется задачами настоящего курса.

[1]) В настоящее время диэлектрическую постоянную принято обозначать через ε.
Переводчик.

[1]) Эти слова Максвелла необходимо сопоставить с тем обстоятельством, что „как бы мы ни понимали движение электричества", данный процесс органически связан с магнитным полем, соответствующим образом ориентированным относительно пути движения электричества. Движущийся электрический заряд представляет собою лишь одну сторону того нераздельного электромагнитного процессу другой стороной которого является некоторый магнитный поток.
Переводчик.

[2]) Курсив переводчика.

§ 48. Мера электрического смещения.

Допустим, что мы имеем некоторый диэлектрик, и пусть действующая в нем в точке *A* электрическая сила *Б* направлена, как указано стрелкой (рис. 105).

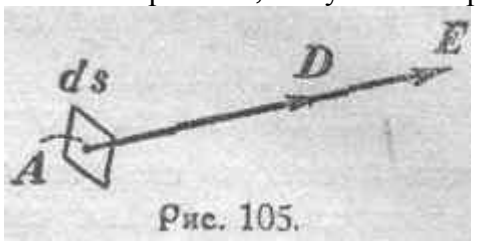


Рис. 105.

Тогда, в случае однородности и изо-

171

тропности диэлектрика, направление электрического смещения будет совпадать с направлением электрической силы.

Величина электрического смещения, которое по существу является векториальной характеристикой поля и которое будем обозначать символом *D*, выражается, по Максвеллу, количеством электричества, смещенным сквозь единицу поверхности за время изменения электрической силы от О до конечной величины. Этим определением Максвелл вложил конкретный физический смысл в понятие электрической поляризации диэлектрика, оставаясь в строгом соответствии с положениями, высказанными Фарадеем. Обозначим через *ds* элементарную площадку в данной точке внутри диэлектрика, перпендикулярную направлению вектора электрического смещения, и через *dq* — количество электричества, смещенного сквозь эту площадку. Тогда максвелловское определение электрического смещения можем представить в такой форме:

$D=dq/ds$. (28)

§ 49. Ток смещения.

Когда мы говорим об электрическом смещении, не следует, вообще говоря, смешивать этого понятия с электрическим током. Термин „электрическое смещение" мы должны понимать как меру деформации, произведенной в диэлектрике и имеющей в каждый данный момент совершенно определенную величину, в то время как понятие „ток" характеризует самый процесс установления смещения. Электрическое смещение для данного конечного значения электрической силы есть производная от смещенного количества электричества по поверхности, сквозь которую смещение происходит, т. е. как было выше указано:

$D=dq/ds$. Сила же электрического тока, который, по Максвеллу, может иметь место в диэлектрике, т. е. сила *тока смещения*, зависит от изменения электрического смещения во времени, вызываемого изменением во времени электрической силы, и плотность тока смещения будет равна производной от электрического смещения по времени, т. е.

$J_D=dD/dt$. (29)

Действительно, если обозначить силу тока через i_0 то мы имеем:

$i=dq/dt$

и, следовательно,

$$J_D = \frac{di}{ds} = \frac{d^2q}{dt\,ds} = \frac{d\left(\frac{dq}{ds}\right)}{dt} = \frac{dD}{dt}.$$

В этом выражении символом J_D мы обозначаем, именно, плотность тока смещения.

Итак, плотность тока смещения J_D равна скорости изменения электрического смещения.

Направление тока смещения в диэлектрике определяется характером изменений электрического смещения. В простейшем случае, когда направление вектора смещения не изменяется, а изменяется лишь его величина, мы будем иметь следующие зависимости. В случае, если электрическое смещение возрастает, можем написать:

$dD/dt=J_D>0$

и, следовательно, ток смещения имеет положительное направление» т. е. то же направление, что и электрическое смещение. Если же смещение убывает, то:

$dD/dt=J_D<0$

Ток смещения в последнем случае будет иметь отрицательное направление, т. е. направление, обратное самому смещению.

Обобщения Максвелла дали возможность установить замкнутость электрического тока благодаря введению понятия об электрическом токе в диэлектриках и изоляторах.

Как видно из приведенных выше (§ 47) выдержек, Максвелл касается характера электрического тока в проводниках и высказывает ту мысль, что его можно рассматривать как частный случай тока смещения в диэлектрике с настолько малой электрической упругостью, что она непрерывно уступает действию электрической силы. Аналогии такому поведению вещества имеются и в области действия чисто механических сил. Так, например, в некоторых смолах, которые в общем ведут себя как упругое вещество, постоянная, хотя бы и очень малая, сила, действующая в течение долгого времени, производит остаточные деформации, заставляя смолу „течь", „уступать".

§ 50. Теорема Максвелла.

Представим себе замкнутую поверхность s, внутри которой как-либо распределены электрические заряды q_1,q_2, q_3 и т. д. Пусть *ds* представляет собою элемент этой поверхности (рис. 106).

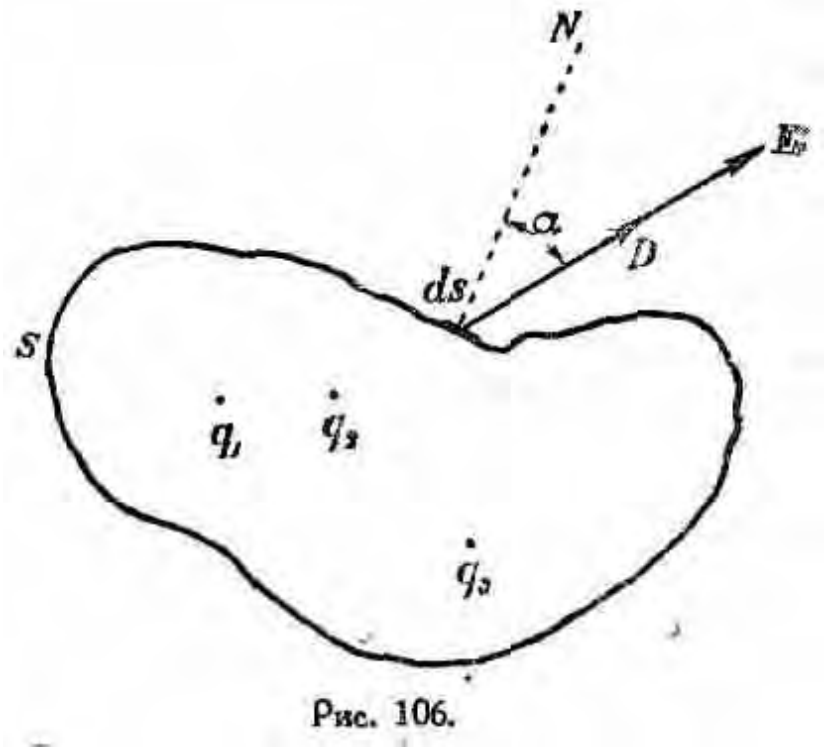


Рис. 106.

Обозначим через α угол, образуемый внешнею нормалью *N* к этому элементу поверхности и направлением электрической силы (напряжения поля) *E* в той точке, где находится рассматриваемый элемент поверхности.

Если диэлектрическая постоянная среды есть ε и если при этом ε *постоянно для всех точек среды*, то по теореме Гаусса, выве-

денной в § 2 для магнитного поля и формально распространяемой также на электрическое поле, имеем:

$$\int_S E \cos\alpha \, ds = \frac{4\pi}{\varepsilon} \Sigma q = \frac{4\pi}{\varepsilon} Q.$$

Разделив обе части этого равенства на 4π/ε и внеся постоянный множитель ε/4π под знак интеграла, получим:

$$\int_S \frac{\varepsilon}{4\pi} E \cos\alpha \, ds = Q.$$

Выражение εE/4π должно

иметь размерность количества электричества на единицу поверхности. Максвелл положил

$D=\varepsilon E/4\pi$, (30)

на основании чего получается крайне простая по форма и весьма важная по содержанию зависимость:

$$\int_S D\cos\alpha\, ds = Q.$$

В этом выражении величина $D\cos\alpha ds$ есть поток электрического смещения сквозь элемент поверхности ds, *а* $D\cos\alpha$ — нормальная составляющая электрического смещения сквозь этот элемент поверхности.

Для неоднородных и анизотропных диэлектриков, у которых ε не постоянно, мы не умеем доказать аналитически справедливость соотношения (31), но Максвелл ввел гипотезу, согласно которой оно справедливо для любых диэлектриков, независимо от их физических свойств. Все следствия, которые были выводимы из этого допущения, оправдывались при опытной проверке, и, таким образом, они в полной мере подтверждают справедливость высказанной Максвеллом гипотезы. До сих пор неизвестно ни одного факта, находящегося с ней в каком-либо противоречии.

Таким образом, мы будем считать справедливым в самом общем случае соотношение (31):

$$\int_S D\cos\alpha\, ds = Q.$$

Понимая его в этом обобщенном смысле, мы будем называть его *теоремой Максвелла*. Итак, теорема Максвелла гласит: *полное*

электрическое смещение сквозь любую замкнутую поверхность в направлении изнутри наружу равно полному количеству электричества, находящегося внутри этой замкнутой поверхности.

§ 51. Природа электрического смещения.

Максвелл в своих рассуждениях относительно электрического смещения совершенно не касается природы электричества и того, как надо понимать его движение. Все это не имеет значения в формальных построениях и не отражается на данных выше соотношениях.

Если, например, мы имеем два проводника *A* и *B c* зарядами $+q$ и $-q$ (рис. 107), то при соединении их посредством проводника C произойдет нейтрализация зарядов, и мы не будем в состоянии обнаружить в какой-либо части системы присутствия электричества того или иного знака.

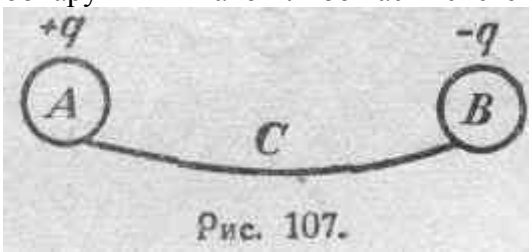


Рис. 107.

При формальном рассмотрении вопроса для нас важно лишь то, что произошло движение электричества, приведшее к нейтрализации, а не способ и порядок, в котором протекало явление; например, двигалось ли по проводнику только количество электричества $+q$ от *A* к *B*, или, наоборот, $-q$ от *B* к *A*, или заряды двигались друг другу навстречу.

Современная наука дает некоторые указания касательно электрического строения материи, однако, этого еще далеко недостаточно для построения полной картины электрических явлений в целом, Можно предполагать, и для этого есть основание, что всякое вещество, вообще, представляет собою в своем нормальном состоянии некоторую совокупность элементарных электрических зарядов раз-

ных знаков, взаимно нейтрализующихся в отношении своих внешних электрических действий, подобно тому, как не оказывает внешних электрических действий некоторый объем электролита, содержащий равные количества ионов разных знаков. Одним словом, всякое вещество мы должны представлять себе как пространство, заполненное двумя равномерными распределениями элементарных электрических зарядов противоположных знаков, при чем в так называемых диэлектриках эти две системы зарядов упруго связаны одна с другой. Под влиянием внешнего воздействия, внешнего электрического поля, происходит смещение этих двух электрических распределений. Одно из них, положительное, смещается в направлении поля; другое, отрицательное, смещается в противоположном направлении. Этот процесс мы можем рассматривать как возникновение упругой деформации в среде, ибо рассматриваемые смещения происходят за счет преодоления внешними силами указанных выше упругих связей между двумя электрическими распределениями. Ясно, конечно, что при прекращении внешних воздействий происходят обратные движения элементарных зарядов благодаря упругим связям, и среда возвращается *в* нормальное, недеформированное
176

состояние. Так можно понимать механизм электрического смещения в диэлектрике. При этом, повторяем, с формальной стороны не важно, какое именно электричество, положительное или отрицательное, приходит в движение и в какой степени они участвуют в этом движении. Важно лишь то, что они вынуждаются к сдвижению друг относительно друга. Поэтому, ради простоты; мы можем в наших рассуждениях принимать, что движется только одно положительное электричество. В действительности же, быть может, происходит как раз обратное.

Что касается того, что, с физической точки зрения представляет собою так называемая „пустота" и какова ее электрическая природа, т. е. каким именно образом можно, хотя бы совершенно предположительно, представлять себе механизм деформации электрического смещения в пустоте, то по этому поводу физика пока еще не дает никакого определенного ответа. Приходится поэтому принять как факт, что электрическое поле и электрическое смещение могут иметь место и в „пустоте". Они могут в пустоте и возникать, и ослабевать. Следовательно, и в пустоте могут быть токи смещения. Из всего этого необходимо только заключить, что термин ,,пустота" следует понимать как чисто условное обозначение пространства, в котором нет обычной материи, но в котором все же могут происходить физические явления и которое может быть местом распределения энергии. Представление о мировом эфире, заполняющем все физическое пространство и наделенном известными свойствами, есть результат одной из попыток человеческой мысли проникнуть в природу „физической пустоты". Некоторые современные научные течения, порвавшие связь с основными физическими воззрениями Фарадея и Максвелла, обходятся без этою представления и развивают формально-математические построения, основываясь на допущении действия на расстояние. Во введении и в первом параграфе настоящей книги была в достаточной степени охарактеризована эта точка зрения, принимаемая главным образом математиками, посвятившими себя решению вопросов из области физики.

§ 52. Пояснения к теореме Максвелла. Выводы из основной формулировки.

Возвратимся к формулировке теоремы Максвелла:

$$\int_s D \cos \alpha \, ds = Q.$$

Взяв от обеих частей этого равенства производную по s, получим:

$$D \cos \alpha = \frac{dQ}{ds}.$$

Рассмотрим теперь рис. 108.

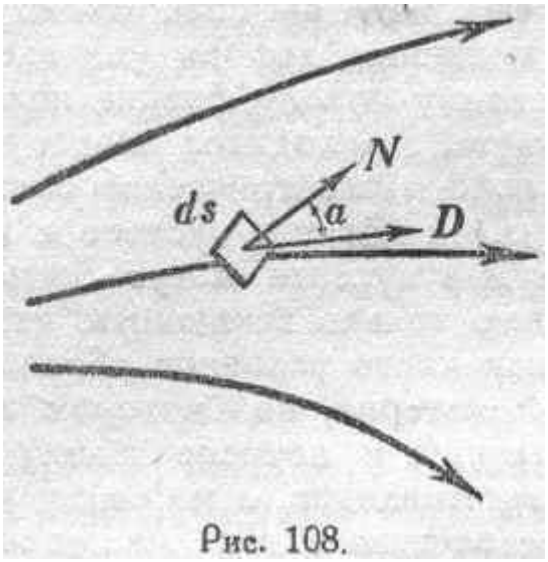


Рис. 108.

Количество электричества, смещенное через площадку *ds*, есть *dQ*, При этом *D*cosα представляет
177

собою нормальную составляющую вектора электрического смещения в данной точке поля. Если S есть поверхность уровня, в таком случае угол между нормалью к ней и направлением вектора электрического смещения равен нулю, и, следовательно, имеем: cosα=l. Окончательно получаем для этого случая:

D=dQ/ds.

Таким образом, *D*, электрическое смещение в данной точке поля, можно определить как количество смещенного электричества, рассчитанное на единицу поверхности уровня, проходящей через данную точку. Полученное определение *D* тождественно с тем, которое дано выше, в § 48.

Представим себе теперь в однородной и изотропной среде шаровую поверхность (рис. 109) с радиусом, равным r, заряд в центре которой будет *q*.

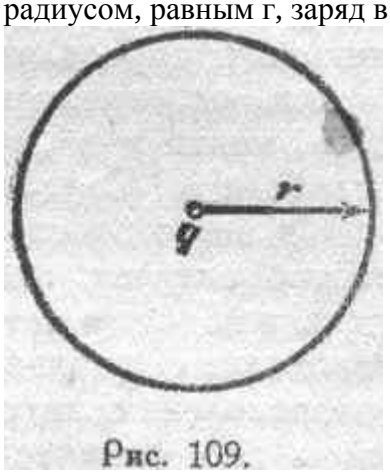


Рис. 109.

Имеем:

$$\int_S D \cos \alpha \, ds = q.$$

Но cosα= l, так как направление вектора электрического смещения совпадает с радиусом сферы. Далее, *D*=const, так как

электрическое смещение одинаково для всех точек сферы вследствие ее симметрии. Поэтому можем написать:

$$\int_s D\cos\alpha\, ds = D\int_s ds = D\,4\pi r^2 = q,$$

откуда

$$D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

Здесь мы еще раз имеем указание на то, что электрическое смещение измеряется количеством электричества, отнесенным к единице поверхности, перпендикулярной вектору *D* в данной точке поля.

178

§ 53. Математическая формулировка принципа непрерывности тока.

Обратимся теперь к математической формулировке принципа непрерывности электрического тока. Рассмотрим какую-либо совершенно произвольную замкнутую поверхность s и выведем выражение для величины полного электрического тока сквозь эту поверхность. Взяв производные по времени от обеих половин основного соотношения, выражающего теорему Максвелла в применении к данной поверхности, мы получим:

$$\frac{d}{dt}\int_s D\cos\alpha'\, ds = \frac{dQ}{dt}$$

или

$$\int_s \frac{d}{dt}\left(D\cos\alpha'\right) ds = \frac{dQ}{dt}.$$

$\frac{d\,(D\cos\alpha')}{dt}$ 1ак как есть нормальная составляющая плотности тока электрического смещения сквозь поверхность, то обозначим ее через $J_D\cos\alpha$, где α есть угол, образуемый вектором тока смещения с внешнею нормалью. Тогда имеем

$$\int_s J_D\cos\alpha\, ds = \frac{dQ}{dt}. \qquad (32)$$

Выражение (32) определяет собою величину полного тока смещения сквозь рассматриваемую замкнутую поверхность. То обстоятельство, что этот ток равен dQ/dt , т. е. скорости изменения полного количества электричества внутри замкнутой поверхности, свидетельствует о существовании в нашей системе еще других токов, кроме тока смещения. Действительно, количество электричества О может изменяться не самопроизвольно, а только в связи с тем, что на ряду с током смещения сквозь поверхность, т. е. токами упругой деформации, обусловливаемыми изменением этой деформации в диэлектрике, сквозь ту же поверхность снаружи внутрь или изнутри наружу проходят еще электрические токи другого рода. Таковыми могут быть, во-первых, ток проводниковый, некоторым образом распределенный по поверхности, и, во-вторых, так называемый конвекционный ток, т. е. ток переноса, состоящий в непосредственном пронесении зарядов, например, в виде газовых ионов, электронов или просто путем движения каких-либо иных тел, заряженных электричеством того или иного знака. На основании изложенного можем написать:

$$\frac{dQ}{dt} = \int_s J_r\cos\beta'\, ds + \int_s J_k\cos\gamma'\, ds,$$

179

где J_r — плотность проводникового тока, β— угол, составляемый направлением этого тока с внутренней нормалью в данной точке поверхности, J_k — плотность конвекционного тока и γ'— соответствующий ему угол. В данной случае мы имеем в виду внутреннюю нормаль к поверхности, ибо речь идет о токах, которые должны покрыть изменения Q, связанные с токами смещения, рассматриваемыми нами, согласно условию, в направлении внешней нормали. Иными словами, токи проводниковый и конвекционный текут сквозь поверхность, в общем обратно току смещения. Принимая во внимание (32), можем написать:

$$\int_s J_D \cos\alpha\, ds = \int_s J_r \cos\beta'\, ds + \int_s J_k \cos\gamma'\, ds.$$

Если мы теперь возьмем, вместо углов β' и γ', углы β и γ, образованные соответствующими токами с внешней нормалью к данной поверхности s, то знаки перед интегралами правой части равенства изменятся на обратные, так как:

$\cos\beta'=\cos(180°-\beta)$,

$\cos\gamma'=\cos(180°-\gamma)$.

Таким образом, получаем:

$$\int_s J_D \cos\alpha\, ds + \int_s J_r \cos\beta\, ds + \int_s J_k \cos\gamma\, ds = 0. \qquad (33)$$

Мы получили математическое выражение принципа непрерывности электрического тока, указывающее, что сумма всех токов сквозь замкнутую поверхность равна нулю, т. е. электричество ведет себя в некотором замкнутом пространстве как несжимаемая жидкость (см. § 47). Полученное выражение можно преобразовать, объединив все выражения под знаком одного интеграла, т. е. написав:

$$\int_s [J_D \cos\alpha + J_r \cos\beta + J_k \cos\gamma]\, ds = 0.$$

В скобках заключена сумма проекций некоторых векторов на направление внешней нормали. Эту сумму можно заменить проекцией результирующего вектора на то же направление. Обозначим плотность результирующего тока через J и угол, образуемый им с внешней нормалью, через 8. В таком случае можем написать:

$$J_D \cos\alpha + J_r \cos\beta + J_k \cos\gamma = J \cos\delta$$

н окончательно имеем:

$$\int_s J \cos\delta\, ds = 0. \qquad (34)$$

180

Выражение (34), являющееся математической формулировкой принципа непрерывности электрического тока, гласит, следовательно, что *полный электрический ток сквозь любую замкнутую поверхность всегда равен нулю.*

§ 54. Механическая аналогия.

Остановимся теперь на одной простой механической схеме с целью лучшего уяснения принципа замкнутости тока, а также для того, чтобы наглядно показать значение введенного Максвеллом в науку представления об электрическом смещении как об упругой деформации.

Рассмотрим некоторый цилиндр K (рис. 110) с поршнем P, периодически двигающимся вперед и назад благодаря соответствующему механическому устройству. При посредстве труб T_1 и T_2 цилиндр

этот соединяется с двумя резервуарами, *M* и *N*, как показано на рисунке. Допустим теперь, что цилиндр, соединительные трубы и нижние части резервуаров наполнены какой-нибудь жидкостью, например, водою; остающиеся же части резервуаров заполнены воздухом. Очевидно, что в зависимости от направления движения поршня *P* в цилиндре *K* в жидкости, заполняющей цилиндр, будут возникать известные давления, совокупность которых мы можем, аналогии ради, назвать „вододвижущей силой", так как они действительно являются непосредственной причиной, приводящей в движение воду в нашей системе. Именно, периодические движения поршня будут сопровождаться соответствующими токами жидкости в трубах T_1 и T_2, причем в резервуарах *M* и *N* уровни жидкости будут то повышаться, то понижаться, в зависимости от направления тока жидкости в трубах. Ясно, конечно, что в данном случае, если только мы можем пренебречь сжимаемостью жидкости и деформированием всех стенок нашей системы, резервуаров и труб, в резервуар *M* будет прибывать столько же жидкости, сколько ее уйдет из резервуара *N*, и наоборот. В данном случае нет замкнутого контура, по которому происходит движение вещества, так как резервуары *M* и. *N* изолированы друг от друга.

Совершенно таким же представляется нам и ток электрический, если мы будем игнорировать процессы в диэлектрике, а все свое внимание сосредоточим только на проводниках. Но благодаря Фарадею и Максвеллу мы знаем теперь, что такая точка зрения была бы неправильна. Электрический ток может течь и через

диэлектрики, но только не непрерывно в одном направлении, ибо упругие реакции в диэлектрике в конце концов кладут предел той деформации электрического смещения, процесс возникновения или вообще изменения которой и составляют, по Максвеллу, ток в диэлектрике. Не трудно, однако, рассмотренную выше модель изменить так, чтобы она иллюстрировала все то, что нами говорилось о замкнутости тока в цепи с конденсатором. Возьмем опять прежний цилиндр *K*. с поршнем *P*, приводимым в попеременное движение при помощи соответствующего механизма. В данном случае пусть трубы T_1 и T_2 соединяют цилиндр, как показано на рис. 111, с двумя диаметрально противоположными сторонами одного общего резервуара, внутри которого находится сплошная упругая перегородка *D*, состоящая, например, из резиновой пластины и делящая весь объем резервуара на две части, *M* и *N*. Допустим далее, что у весь объем рассматриваемой системы, т. е. цилиндр, соединительные трубы и камеры *M* и *N*, *сплошь заполнены* жидкостью, скажем, водой. В отличие от предыдущего случая, камеры *M* и *N* не изолированы теперь одна от другой. Действительно, всякое увеличение количества воды в камере *M* вызовет упругую деформацию перегородки *D*, которая будет изгибаться и при этом вытеснит соответствующее количество воды из камеры *N*. При каждом данном значении разности давлений в камерах *M и N* степень деформирования упругой перегородки *D* будет совершенно определенная и притом такая, что упругая реакция со стороны перегородки будет уравновешивать разность давлений с обеих ее сторон. Если эта разность давлений перестанет существовать, упруго деформированная перегородка немедленно вернется в свое нормальное положение, ее вынужденное состояние прекратится. При переменном движении поршня, т. е. при возникновении в рассматриваемой системе переменной „вододвижущей силы", перегородка *D* будет периодически изгибаться то в ту, то в другую сторону, соответственно направлению тока жидкости и вообще материи в той *замкнутой* цепи, которую в настоящем случае представляет наша система. Таким образом, модель, изображенная на рисунке 111, схематически иллюстрирует замыкание электрического тока через диэлектрик.

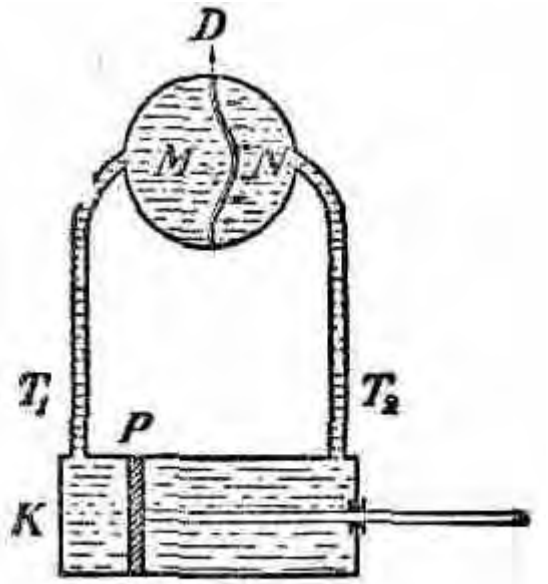


Рис. 111.

§ 55. Непрерывность тока в случае электрической конвекции.

Переход электричества из одного места в другое путем движения заряженных тел вообще и, в частности, заряженных элементарных частиц называется *электрической конвекцией* и представляет собою так называемый конвекционный ток. На возможность такого рода токов указал еще Фарадей. Так, например, в § 1644

182

своих „Опытных исследований по электричеству" он говорит: „...таким образом, если шар, находящийся среди комнаты, будет заряжен положительно и затем будет приведен в движение в некотором направлении, то будет наблюдаться такой же эффект, как если бы существовал *ток* того же направления (пользуемся обычными выражениями); или если бы шар был заряжен отрицательно и затем приведен в движение, наблюдался бы эффект, соответствующий току обратного направления". Опыты Роуланда и других, в том числе А. А. Эйхенвальда, в полной мере доказывают существование подобных конвекционных токов. В последнее время представление об этих токах получило широкое применение при описании и изучении явлений прохождения электрического тока через газы. В этом случае, как показывает опыт, течение электричества по цепи действительно осуществляется легко обнаруживаемым движением более или менее тяжелых частиц вещества, заряженных положительно или отрицательно, а также движением электронов. На основании принципа непрерывности электрического тока мы можем утверждать, что ток конвекции всегда должен либо, как таковой, протекать по всему контуру тока, что имеет место, например, в случае прохождения тока через газы при отсутствии электродов (так называемый безэлектродный разряд), либо же ток конвекции в одной части цепи должен дополняться и замыкаться через посредство токов другого рода, т. е. токов проводниковых и токов смещения. Интересно проследить, как выполняется замкнутость тока в простейшем случае движения изолированного обособленного тела, несущего на себе заряд. Мы, таким образом, остановимся на рассмотрении некоторых сторон того случая конвекционного тока, к которому относятся цитированные выше слова Фарадея. Допустим, что некоторая частица с зарядом положительного электричества $+q$ движется с некоторою скоростью u, как показано стрелкой на рис. 112. При последовательном перемещении заряда, в каждой точке среды, окружающей этот заряд и, вообще говоря, неподвижной, будет происходить непрерывное изменение деформации электрического смещения. Следовательно, при движении заряда q в пространстве, его окружающем, будут иметь место токи смещения. Ближайшее рассмотрение этих токов смещения показывает, что

они как-раз дополняют ток конвекции, т. е. ток переноса количества электричества q таким образом, что образуется замкнутая цепь тока. Действительно, в неподвижной точке пространства A_1, находящейся на линии движения перед зарядом q, электрическое смещение D_1 будет непрерывно возрастать, и потому имеем:

$$J_{D_1} = \frac{dD_1}{dt} > 0,$$

т. е. плотность тока смешения в точке A_1 равная J_D, будет положительного направления, другими словами, ток будет течь в направлении вектора D_1. Это и показано на рисунке 112 надлежащим расположением стрелки, изображающей ток J_{D1}. Другая картина

183

будет в неподвижной точке пространства A_2, находящейся позади движущегося заряда q. В этой точке, по мере удаления заряда от нее, электрическое смещение D_2 будет непрерывно убывать по величине, оставаясь неизменным по направлению. Поэтому для точки A_2 можем написать:

$$J_{D_2} = \frac{dD_2}{dt} < 0,$$

т. е. плотность тока смещения в точке A_2, равная J_{D2}, будет отрицательного направления. Это значит, что ток будет течь обратно . направлению вектора D_2, т. е. в направлении движения заряда q. Таким образом, мы видим, что токи смещения в точках A_1 и A_2 составляют один продолжение другого. При этом движущийся заряд q, образующий конвекционный ток в той точке пространства, где в данный момент находится заряд, играет роль как бы связующего звена между токами смещения впереди и позади заряда. Картина того, как конвекционный ток в данном случае замыкается через посредство токов смещения, становится еще нагляднее, если рассмотреть какую-либо неподвижную точку пространства, лежащую в стороне от линии, по которой происходит движение заряда q. Рассмотрим, например, точку A_3. Электрическое смещение в этой точке изображается (рис. 112) вектором D_3, который при движении заряда q будет изменяться по величине и направлению.

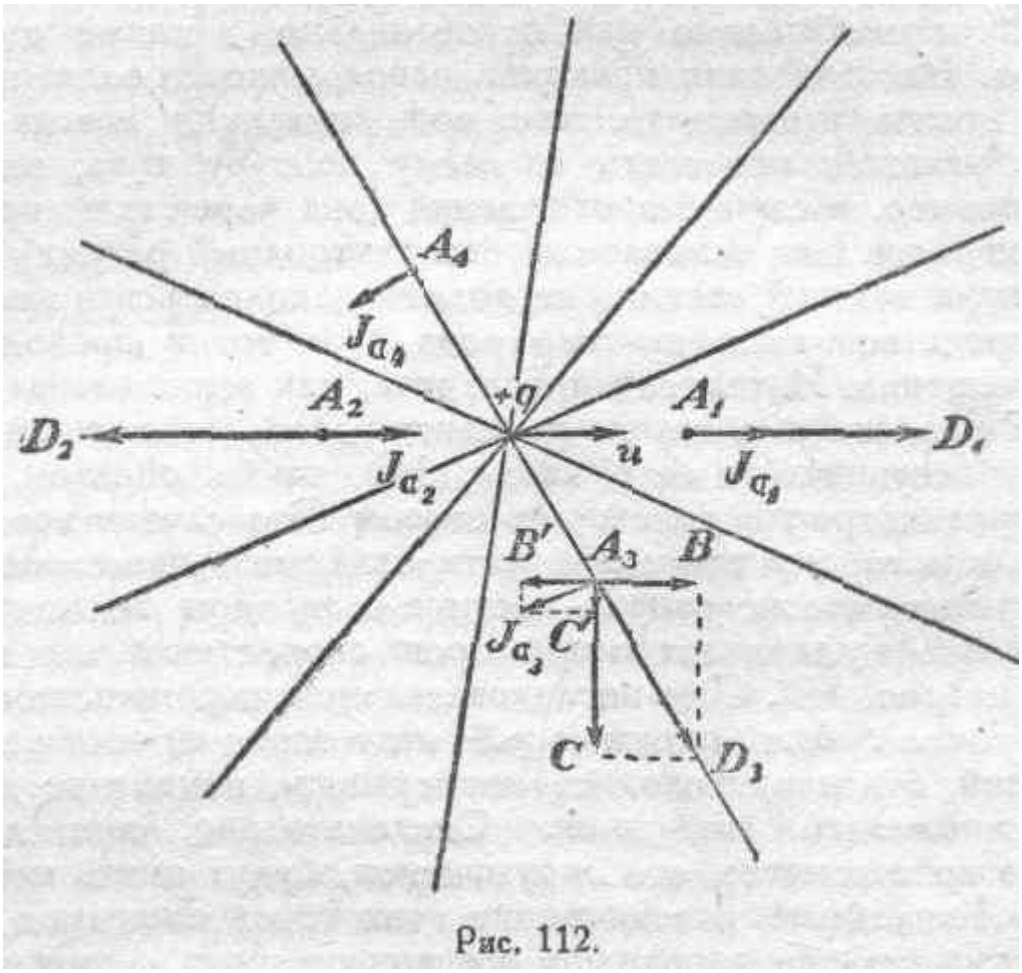


Рис. 112.

Направление тока смещения в точке A_3 можно определить следующим образом. Разложим вектор D_3 на две составляющие: A_3B в на-

правлении движения заряда и A_3C в направлении, перпендикулярном движению. Не трудно сообразить, что составляющая A_3B будет уменьшаться во время движения заряда, и это породит ток смещения A_3B', составляющая же смещения A_3C будет при этом возрастать, и это обусловит наличие тока смещения A_3C'. Складывая токи A_3B' и A_3C' по правилу параллелограмма, получим результирующий ток смещения в точке A_3 в виде вектора J_{D3}, изображенного на рисунке. Таким же точно путем можем найти ток J_D в точке A_4 и т. д. Очевидно, что все эти токи смещения, возникающие в пространстве, окружающем движущийся заряд q, дополняют ту картину, которую мы получили, рассмотрев точки A_1 и A_2, и являются по существу совершенно необходимыми для того, чтобы и в рассматриваемом случае полностью соблюдался основной закон природы: принцип непрерывности тока.

§ 56. Сложные примеры непрерывности тока.

В качестве первого примера сложной комбинации токов разного рода рассмотрим случай, схематически представленный на рис. 113.

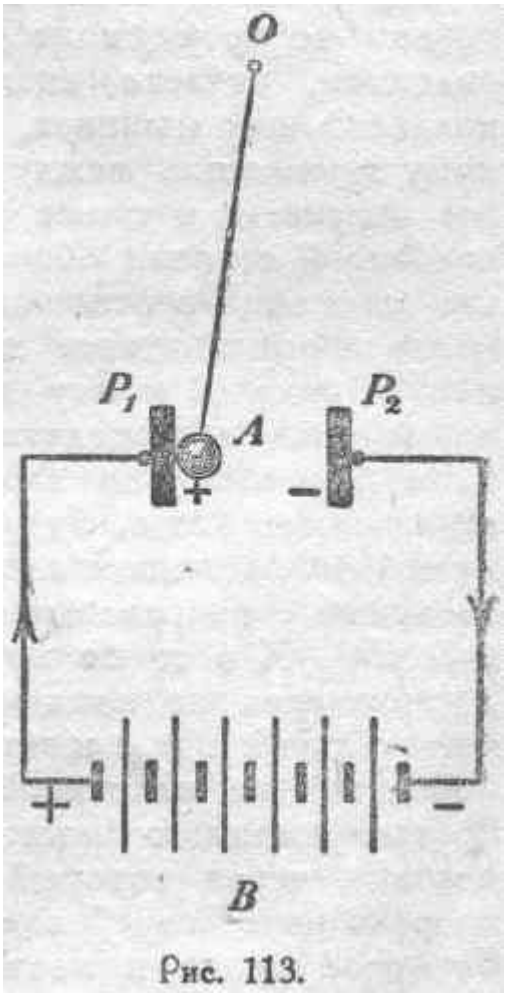


Рис. 113.

Это есть не что иное, как „электрический маятник". Здесь *B* представляет собою высоковольтную батарею, P_1 и P_2 — металлические пластины, между которыми создается электрическое поле, *A* — легкий проводящий шарик, подвешенный в точке О" на шелковой нити. Как вообще работает электрический маятник, это всем известно из элементарного курса физики. Процесс начинается с того, что шарик *A*, благодаря некоторой несимметрии в системе, притягивается к одной из заряженных пластин, скажем, к P_1. При прикосновении к пластине шарик приобретет потенциал этой пластины, зарядится положительно и оттолкнется, направляясь к противоположно заряженной пластине P_2. Во время этого движения непосредственно в промежутке между P_1 и *A* будут усиливаться электрическое поле и электрическое смещение в направлении от P_1 к А Следовательно, в этом промежутке будет иметь место ток смещения того же направления. В то же время в промежутке между *A* и P_2 также будут усиливаться поле и электрическое смещение в направлении от *A к* P_2. Таким образом, и с этой стороны шарика возникает ток смещения, направленный от P_1 к P_2. Итак, при переносе шаря; ом положительного заряда от P_1 к P_2 возникаю-
185

щие в этом промежутке токи смещения имеют вполне согласное направление от P_1 к P_2. При этом, конечно, по проводящей части цепи будет протекать ток, как показано на рисунке стрелками. Когда шарик *A* коснется пластины P_2 и будет заряжаться отрицательно, в это время между *A* и P_2 будет протекать проводниковый ток. Одновременно с этим в промежутке между P_1 и *A* поле и электрическое смещение будут продолжать усиливаться, и этот процесс усиления будет продолжаться и тогда, когда шарик, оттолкнувшись от P_2, начнет обратно притягиваться к P_1. В промежутке же непосредственно между *A* и P_2 электрическое смещение, достигшее максимума перед самым моментом контакта, в этот момент ослабевает и доходит до нуля, так как разность потенциа-

лов между A и P_2 падает во время контакта до нуля. При этом в непосредственной близости к месту контакта в диэлектрике возникает кратковременный ток смещения, имеющий направление, обратное проводниковому току в контакте. Принимая во внимание, что проводниковый ток в месте контакта всегда имеет направление, согласное с направлением общего тока в рассматриваемом основном контуре, в данном случае по часовой стрелке, мы должны признать, что только-то упомянутый кратковременный ток смещения в районе контакта не входит в общий основной контур тока, а образует местный контур добавочного тока, существующего только во время контакта. Здесь мы встречаемся с интересным явлением, отчасти аналогичным тому, что происходит во всех коллекторных машинах, когда в зоне коммутации, благодаря короткому замыканию между двумя соседними пластинами коллектора, мы получаем местные короткозамкнутые токи, протекающие до некоторой степени обособленно от главной цепи машины. То, что мы выяснили в отношении контакта между A и P_2, будет иметь место и при контакте между A и P_1. Таким образом, при колебании шарика A между пластинами P_1 и P_2, в этом промежутке, кроме тока непосредственной конвекции, осуществляемой движением положительно заряженного шарика вправо и отрицательно заряженного влево, будут существовать токи смещения, обусловливаемые нарастанием электрического смещения от P_1 к P_2 и согласованные с направлением тока в нашей основной цепи (по часовой стрелке). И в то же время деформация электрического смещения, достигающая по каждую сторону шарика A максимума за время между двумя последовательными соприкосновениями шарика с одной и той же пластиной, в момент контакта исчезает в процессе кратковременного местного тока, замыкающегося через тот же контакт, через который течет и главный ток, при чем, конечно, энергия исчезающей электрической деформации превратится в добавочное тепло в месте контакта. Так осуществляется принцип непрерывности тока в рассмотренном случае электрического маятника.

. Рассмотрим теперь случай линии передачи электрической энергии. На рис. 114 схематически представлено начало этой линии.

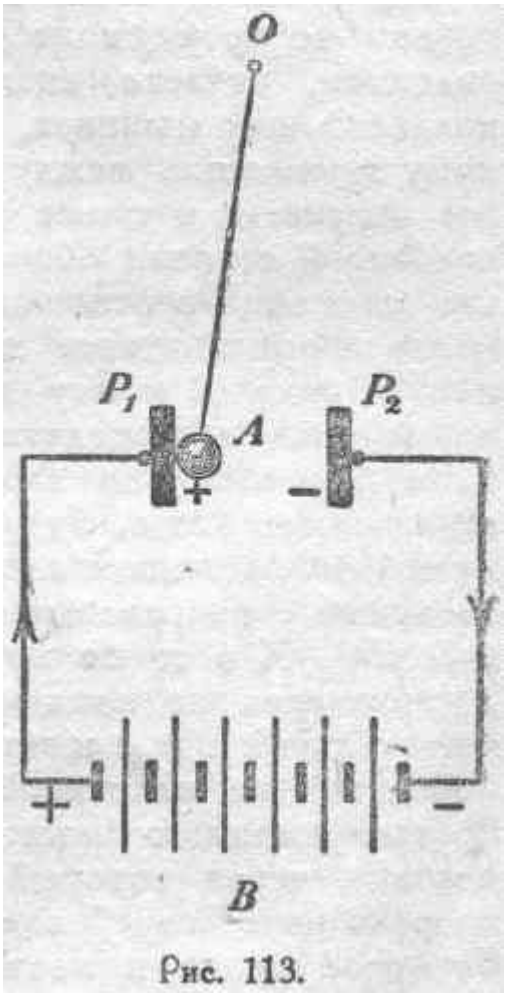


Рис. 113.

Здесь *T* представляет трансформатор, получающий первичную
186

энергию от генераторных зажимов *M N* и повышающий напряжение, которое затем подается на линию передачи, которая в данном примере, ради упрощения схемы, представлена как линия двухпроводная, однофазная. Обследуем вопрос о том, каким образом в этом случае замыкается ток, идущий от трансформатора *T* в линию. Ясно, конечно, что прежде всего необходимо учесть ток, текущий непосредственно по проводам и, вообще говоря, замыкающийся на другом конце линии через приемную подстанцию. Но, кроме этого проводникового тока, необходимо еще принять во внимание то обстоятельство, что среда, находящаяся в промежутке между проводами *A* и *B* и окружающая их со всех сторон, не остается совершенно безучастной в процессе передачи энергии. Дело в том, что, в случае передачи энергии переменными токами, напряжение между проводами линии непрерывно меняется, и вместе с тем непрерывно меняется электрическое поле в пространстве вокруг проводов и между ними. Следовательно, в этом пространстве непрерывно изменяется деформация электрического смещения. Поэтому в нем во все время работы линии передачи имеют место токи смещения, проходящие через диэлектрик в направлении от одного провода к другому, т. е. от *A* к *B* или от *B* к *A*, и притом в таком направлении, что путем этих токов смещения отчасти замыкается тот полный ток, который исходит от высоковольтных зажимов трансформатора. Другими словами, токи смещения между проводами линии передачи являются ответвлениями, равномерно распределенными вдоль всей линии. Вследствие этого через поперечные сечения различных участков проводов *A* и *B* протекают токи неодинаковой силы. Действительно, по проводам участка A_0B_0 текут составляющие полного тока, замыкающиеся далее через токи смещения на участках A_1B_1, A_2B_2 и т. д.

Подобным же образом на участке A_1B_1 в состав проводникового тока входят токи смещения последующих участков A_2B_2, A_3B_3 и т. д. Эти токи смещения играют, таким образом, существенную роль в процессе передачи энергии, и полный учет их необходим при расчете протяженных линий передачи. Обыкновенно их рассматривают с формальной стороны как емкостные токи, т. е. как токи, идущие на заряжение емкости последовательно расположенных участков линии. Как видим, эти емкостные составляющие полного тока в линии представляют собою, с максвелловской точки зрения, не что иное, как именно

токи смещения в диэлектрике, разделяющем провода. Являясь результатом непрерывных изменений упругой деформации в изолирующей среде, токи смещения не влекут за собой никаких потерь в таком более или менее совершенном диэлектрике как воздух. Но, кроме токов смещения через воздух, в рассматриваемом случае имеют место еще токи смещения в тех изоляторах, к которым крепятся провода. Эти токи обычно сопровождаются потерями энергии на так называемый диэлектрический гистерезис (см. § 71). Кроме токов смещения, имеющих место между проводами, есть еще и другие факторы, обусловливающие ответвления вдоль линии от главного тока. Дело в том, что поверхность изоляторов, обычно покрытая пылью и влагой, совместно с металлическими частями изоляторной конструкции и частями опор играет роль известного соединения между проводами *A* и *B*. Сюда же следует отнести и утечки тока, зависящие от некоторой нормальной проводимости, которою, хотя и в ничтожной степени, обладает вещество всех применяемых на практике изоляторов. Наконец, когда напряжение между проводами превышает предел, зависящий в каждом отдельном случае от расстояния между проводами, от их диаметра, от атмосферных условий и т. д., т. е. когда напряжение будет выше критического, в линии передачи обнаруживается появление так называемой „короны", т. е. тихого разряда между проводами через воздух. Этот вид разряда возникает благодаря образованию у поверхности проводов при достаточно сильном электрическом поле свободных ионов, как положительных, так и отрицательных. Как только появляются ионы в пространстве вокруг проводов, они тотчас же начинают двигаться от одного провода к другому, образуя ток электрической конвекции. Таким образом, в последнем случае через воздух, разделяющий провода, будет течь, кроме тока смещения, еще и конвекционный ток, могущий оказаться серьезной причиной потерь энергии в линии передачи и потому, как нормальное явление, недопустимый. Явление короны и конвекционные токи между проводами вместе с соответствующими потерями обычно имеют место только при наличии каких-либо ненормальных режимов в линии передачи. Все рассмотренные добавочные факторы утечки тока между проводами еще более увеличивают то различие в силе тока в проводах вдоль линии, о котором мы говорили по поводу токов смещения. Как бы сложны, однако, ни были условия, в которых возникают и существуют токи разных категорий, встречающиеся в линиях передачи энергии, во всяком случае всегда эти токи протекают по замкнутым цепям.

В заключение остановимся на случае токов во внешних частях радиоотправительной установки. Пусть M_1 и M_2 представляют мачты (рис 115), поддерживающие при помощи изоляторов антенну BA_1A_2.

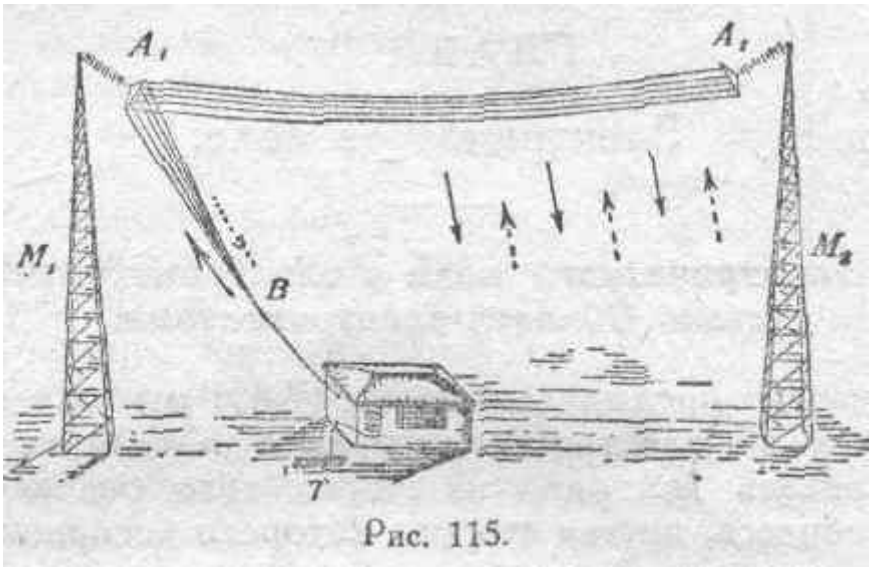


Рис. 115.

Через посредство снижающейся части *B* антенна присоединяется к радиогенераторному устройству, помещающемуся в здании станции и сообщающемуся с другой стороны с противовесом или с землею *T*. Во время работы радиостанции, по снижению *B* идут частопеременные токи, которые замыкаются далее главным образом

через емкость антенны, как токи смещения сквозь диэлектрик, окружающий верхнее строение антенны. Если, например, ток в части *B* идет от станции вверх, как показано сплошной стрелкой, то часть A_1A_2 будет заряжаться положительно, и между этой частью и поверхностью земли будет возникать электрическое поле и смещение в направлении сверху вниз. Это возрастающее смещение обусловит появление в пространстве токов смещения, направленных от A_1A_2 к поверхности земли (сплошные стрелки). При обратном направлении тока в снижении *B* (пунктирная стрелка) токи смещения в окружающем пространстве будут течь по обратному направлению, т. е. от поверхности земли к части A_1A_2 (пунктирные стрелки). Эти токи смещения через диэлектрик, окружающий антенну, существенно необходимы для того, чтобы она могла излучать электромагнитную энергию в пространство, ибо при этом создаются условия, благодаря которым энергия, распределенная в диэлектрике, может освобождаться от непосредственной связи с основным радиогенераторным устройством. В настоящей стадий изучения вопроса для нас является существенным констатирование того факта, что электрические токи смещения, имеющие место в поле антенны, в полной мере подчиняются принципу непрерывности тока. В рассматриваемом примере часто переменный ток, протекающий по части *B*, может еще замыкаться через утечку по изоляторам, а также через посредство электрической конвекции, обычно имеющей место у концов антенны, где напряжение достигает больших значений, достаточных для появления короны. Все эти добавочные явления следует рассматривать как паразитные, отвлекающие на себя часть энергии и понижающие коэффициент полезного действия радиоустановки. Действительная мощность ее определяется именно силою и степенью развития токов смещения в окружающем пространстве.

Итак, мы видим, сколь большое значение имеют токи смещения в общей схеме тех электрокинетических процессов, с которыми мы нередко встречаемся в различных случаях, представляющих интерес как с чисто теоретической, так и с практической точек зрения.

ГЛАВА IV. Электрическое поле.

§ 57. Связь электрического поля с электромагнитными процессами. Область электростатики.

В самом начале предыдущей главы (§ 45) мы касались в общих чертах вопроса об электрическом поле и указывали, что его следует рассматривать как одну из сторон того основного электро-

магнитного процесса, другая сторона которого воспринимается нами как магнитный поток. В различных случаях эта вторая сторона явления может быть выявлена в большей или меньшей степени. Мы указывали, что даже в тех случаях, когда нам кажется, что существует лишь чисто электрическое поле, как самостоятельное явление, при чем никаких сопутствующих магнитных полей как будто бы не наблюдается, на самом деле в какой-либо части системы происходит электромагнитный процесс в скрытом виде. Так, например, в случае заряженного металлического шара, неподвижно стоящего на какой-либо изолирующей стойке, электрическое поле в пространстве, окружающем шар, повидимому, представляет собою нечто в такой степени неизменное, что есть известное основание называть его э*лектростатическим,* между тем как это электростатическое поле, так сказать, опирается на поверхность тела, где расположен электрический заряд, элементы которого мы не можем себе представить иначе, как в состоянии непрерывного движения. Весьма возможно, однако, что во многих случаях термин „электростатическое поле" вполне отвечает существу дела, характеризуя собою какую-то статическую деформацию в пространстве, подобную, например, той упругой деформации, которая возникает в стенках резинового шара, когда во внутреннюю полость его будем нагнетать воздух. Но и в приведенном примере статическая деформация в упругой среде не есть самостоятельное нечто, ни с чем не связанное, в действительности же она есть лишь проявление того кинетического процесса, который происходит в массе газа и обусловливает давление на стенки заключающей его камеры.
190

В параграфах 58 и 59 мы подробнее остановимся на общих признаках; „электростатического поля", а теперь отметим лишь то обстоятельство, что подобное поле всегда рассматривается в каком-либо ограниченном объеме, за пределами которого обязательно имеет место основной процесс электромагнитного характера. Совершенно аналогичную картину мы имеем и в случае магнитного поля, которое иногда нам кажется чем-то самостоятельным, не связанным с явлениями электрического характера. Пример подобного магнитного поля мы имеем в случае постоянного магнита, вне которого поле представляется самостоятельным магнитным полем, а внутрь которого, в область атомных и молекулярных процессов электромагнитного характера, мы можем проникнуть только нашим умственным оком. Та же картина будет и во внешнем пространстве и вокруг некоторой цилиндрической камеры, изготовленной, скажем, из листовой меди, если внутрь этой камеры поместим соответствующую катушку из изолированной проволоки без всякого железного сердечника и пропустим постоянный ток через катушку.

Для пояснения всего сказанного выше об электрическом поле рассмотрим случай, аналогичный опыту Фарадея с вращающимся магнитом (§ 4). Представим себе вращающийся вокруг оси цилиндрический магнит *NS* (рис. 116), простирающийся беспредельно далеко по обе стороны от плоскости *PQ,* перпендикулярной оси магнита, или же магнит конечной длины, но так расположенный относительно другого неподвижного магнита, чтобы магнитный поток, пронизывающий данный магнит *NS,* замыкался полностью через неподвижный магнит.

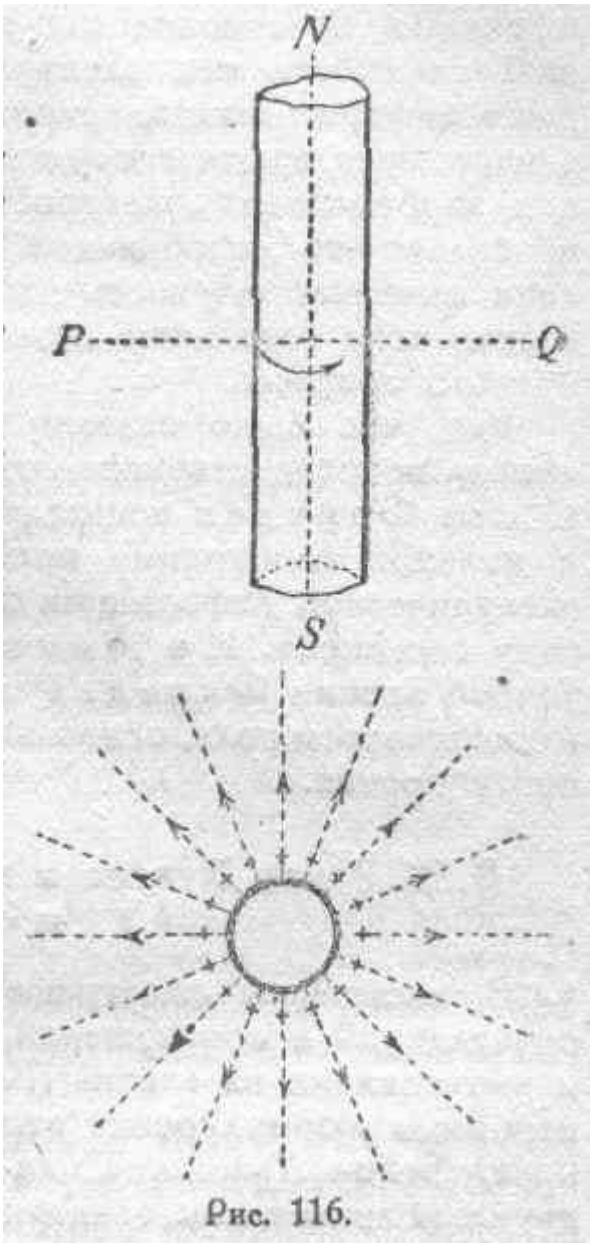


Рис. 116.

В обоих случаях внешнее магнитное поле в пространстве, непосредственно окружающей вращающийся магнит *NS*, будет совершенно отсутствовать. В то же время в радиальных элементах вращающегося магнита, по Фарадею, будет индуктироваться ЭДС, которая вызовет электрическое смещение в диэлектрике, окружающем магнит. При этом на поверхности магнита *NS* появятся электрические заряды соответствующего знака. Мы получили бы тот же результат, рассуждая и по Прэстону, но только рассуждения эти в данном случае были бы несколько сложнее. Одним словом, вокруг рассматриваемого магнита появится электрическое поле, которое, в случае постоянной скорости вращения магнита и неизменности общих условий, можно считать

191

„электростатическим" с таким же правом, как и поле вокруг заряженного шара. При этом, в плоскости *PQ* силовые линии электрического поля будут расположены так, как это показано в нижней части рис. 116. Если бы мы взяли два подобных цилиндрических магнита, параллельных друг другу и так вращающихся, чтобы на их поверхностях образовались заряды разных знаков, то между

ними должно наблюдаться притяжение, причем сила эта будет той же природы, что и сила механического взаимодействия между двумя бузинными шариками, противоположно наэлектризованными. Вследствие 'большой сложности тех электромагнитных процессов, которые протекают внутри всякого заряженного тела и на его поверхности, в настоящее время затруднительно еще дать полную картину того, как зарождается „электростатическое поле" в обычных случаях, но только-что разобранный пример (рис. 116) в достаточной степени выявляет сущность нашего утверждения, что всякое электрическое поле есть лишь одно из проявлений основного электромагнитного процесса.

Все, что было сказано в § 1 о роли промежуточной среды, имеет непосредственное отношение и к электрическому полю. Опыты Фарадея показали, что все электрические взаимодействия и явления необходимо понимать как результат распространения электрической деформации от одного элемента объема среды к другому соседнему. И в то же время Максвелл выяснил, что между точкой зрения Фарадея и формальными достижениями учения об электрическом поле, основанного на законе Кулона, нет никакого противоречия.

§ 58. Закон Кулона и вытекающие из него определения и соотношения.

В настоящем параграфе мы даем краткую сводку основных определений и соотношений, относящихся к электрическому полю я вытекающих из закона Кулона. В первую очередь, конечно, напомним формулировку этого исходного закона.

а) Закон Кулона. Сила механического взаимодействия между двумя количествами электричества, q_1 и q_2, находящимися в двух точках на расстоянии r одно от другого, в любой однородной среде, направлена вдоль прямой, соединяющей эти точки, и выражается следующим образом:

$$f = k\frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где k есть коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц и от свойств среды.

В абсолютной электростатической системе единиц принимают для пустоты k численно равным единице.

В таком случае *закон Кулона для пустоты* численно принимает следующий вид:

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Для всякой однородной и изотропной среды, как показывает опыт,

$k=1/\varepsilon$,

где ε есть диэлектрическая постоянная среды. И *закон Кулона для однородной и изотропной среды* выражается таким образом:

$$f = \frac{1}{\varepsilon}\cdot\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Ясно, что диэлектрическая постоянная пустоты, обозначаемая специальным символом ε_0, в абсолютной электростатической системе единиц принимается равной единице, т. е. мы имеем:

$\varepsilon_0=1$.

Точная же формулировка закона Кулона для случая пустоты получает следующий вид:

$$f = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

б) Единица количества электричества. Обращаясь к формулировке закона Кулона для пустоты и полагая:

$q_1=q_2=q$, $f=1$, r=1, а также принимая во внимание соотношение:
$\varepsilon_0=1$,
получаем:
$q=1$,
т. е. за единицу количества электричества в абсолютной электростатической системе единиц принимается такое количество электричества, которое в пустоте взаимодействует с силою, равною одной дине, с другим таким же количеством, расположенным на расстоянии одного сантиметра от первого.
Абсолютная электростатическая единица количества электричества связана следующим образом с абсолютной электромагнитной единицей и с практической электромагнитной единицей количества электричества, т. е. с кулоном:
1 абс. эл.-магн. ед. кол. электр.=$3\cdot10^{10}$ абс. эл.-стат. ед. кол. электр.
1 кулон=$3\cdot10^{9}$ абс. эл.-стат. ед. кол. электр.
Количество электричества, или электрический заряд, представляет собою некоторую физическую сущность, с которою мы в действительности встречаемся на опыте. Если это сравнить с тем, что говорилось выше (§ 31) о магнитных массах, то станет достаточно ясно, что необходимо относиться с известной осторожностью к тем формальным сближениям между электрическим и магнитным полями, которые являются результатом применения в обоих случаях закона Кулона, как исходного положения. Хотя с формальной стороны
193

есть много общего между электрическим полем и полем магнитным и хотя они по природе своей теснейшим образом связаны основным электромагнитным процессом, тем не менее это—*различные* стороны основного процесса. Мы пользуемся при формальном описании этих полей аналогичными определениями и понятиями. Не следует забывать, что физическое содержание этих понятий в обоих случаях совершенно различно.
в) *Электрическая сила* или *напряженность электрическою поля (Е).* Рассмотрим электрическое поле в пустоте. Если / есть механическая сила, действующая на количество положительного электричества *q*, помещенное в некоторой точке, то электрическая сила в данной точке определяется по величине и направлению следующим соотношением:
$E=f/q$,
причем предполагается, что помещение заряда *q* в данной точке не изменяет общего распределения электрических зарядов в системе. Таким образом, можно сказать, что электрическая сила в некоторой точке измеряется механической силой, которую испытывала бы в этом месте единица положительного электричества. Электрическая сила есть вектор.
Все оговорки, сделанные в пункте *в* параграфа 2 относительно определения магнитной силы, в полной мере сохраняют свое значение и при определении электрической силы с соответствующей, конечно, заменой магнитных величин электрическими.
г) *Силовыми линиями* электрического поля называются такие линии, все элементы которых совпадают по направлению с векторами электрической силы в тех точках поля, где эти элементы расположены.
д) *Электрический потенциал (U).* Рассмотрим некоторую точку А, расположенную в электрическом поле (рис. 117).

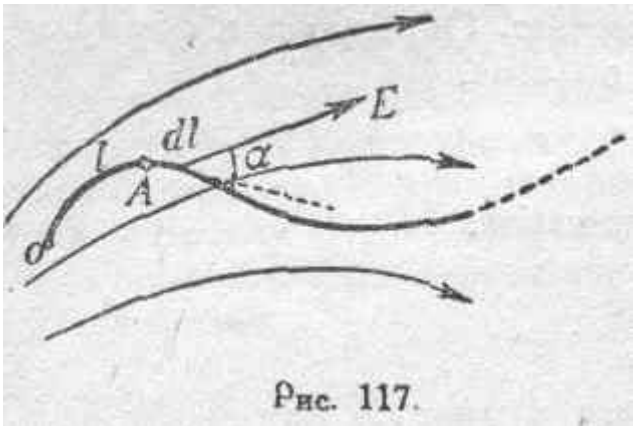


Рис. 117.

Пусть произвольная линия *OA* продолжается от точки *A* в бесконечность. Возьмем линейный интеграл электрической силы *E* от точки *A* вдоль этой линии до бесконечности:

$$\int_A^\infty E\cos\alpha\, dl.$$

Здесь а есть угол между направлением элементарного перемещения *dl и* вектором *E*. Подинтегральная величина $E\cos\alpha dl$ численно равна работе перемещения единицы положительного электричества вдоль пути *dl,* а весь интеграл представляет собою работу, совершаемую силами электрического поля при перемещении единицы положительного электричества *(q*=+1*)* по данному пути из

точки *A* в бесконечность. Величина этого интеграла, вообще говоря, может зависеть от выбора пути перехода из точки *A* в бесконечность. Так бывает, между прочим, всегда, когда в пространстве, в котором мы рассматриваем данное электрическое поле, происходит электромагнитный процесс, связанный, например, с изменениями магнитного поля и с движением магнитных линий (см. § 59). Есть, однако, случаи, когда никаких явных электромагнитных процессов в поле не наблюдается, и все происходит так, как будто бы электрическое поле обусловлено только наличием электрических зарядов, так или иначе распределенных в системе. Такие случаи характеризуются независимостью величины линейного интеграла электрической силы от пути перехода. Поле, в котором соблюдается подобное условие, обычно именно и называется *электростатическим*. Итак, в электростатическом поле величина интеграла

$$\int_A^\infty E\cos\alpha\, dl$$

имеет для каждой точки поля вполне определенное
значение. Это значение линейного интеграла электрической силы является мерой напряженности электрического состояния в точке *A* и называется *электрическим потенциалом* точки *A*. Его обычно обозначают знаком *U*. Таким образом, можем написать:

$$U=\int_A^\infty E\cos\alpha\, dl. \qquad (35)$$

Как известно, в электростатическом поле потенциал любой точки может быть также вычислен в зависимости от распределения электрических зарядов в системе. Именно, в среде однородной и изотропной

$$U = \int_A^\infty E \cos \alpha \, dl = \frac{1}{\varepsilon} \int \frac{dq}{r},$$

где dq есть элемент электрического заряда и r — расстояние его от данной точки A, причем во втором интеграле операция интегрирования распространена на все электрические заряды, с которыми связано рассматриваемое электрическое поле.

Единица потенциала в абсолютной электростатической системе не имеет специального названия. Практическая электромагнитная единица потенциала называется *вольтом*. Связь между ними выражается следующим соотношением:

1 вольт $= {}^1/_{300}$ абс. эл.-стат. единицы потенциала.

Электрический потенциал, вообще говоря, различен для различных точек поля и является функцией геометрических координат точки, т. е. $U=f(x, y, z)$.

Эту функцию обычно называют *потенциальной функцией*, и электрический потенциал некоторой точки можно в таком случае определите как значение потенциальной функции в данной точке.

195

Кроме электростатического поля, есть еще и другие случаи, когда линейный интеграл электрической силы можно считать не зависящим от выбора линии интегрирования, при соблюдении, однако, некоторых специальных условий, которые должны быть особо оговорены. И в этих случаях можно еще пользоваться представлением об электрическом потенциале, как о некоторой определенной физической величине (см. § 59).

При изложении дальнейших пунктов настоящего параграфа мы будем иметь в виду всякое вообще электрическое поле, в пределах которого представление об однозначном электрическом потенциале сохраняет физический смысл.

е) *Поверхности* уровня или *равнопотенциальные поверхности.* Приравняем потенциальную функцию к какой-либо постоянной величине, т. е. положим:

$U=(x, y, z)=\text{const}$. (36)

Мы пришли, таким образом, к уравнению некоторой поверхности, все точки которой имеют один и тот же потенциал. Это и есть поверхность уровня, или равнопотенциальная поверхность. Придавая потенциалу U различные частные значения, например 1, 2, 3 или 100, 200, 300 и т. д. вольт, можно получить целый ряд поверхностей уровня, расположение которых характеризует электрическое поле в той же мере, как и система силовых линий. О связи поверхностей уровня с силовыми линиями см. следующий пункт *„ж"*.

ж) *Градиент, потенциала.* Рассмотрим некоторый путь перехода от точки A в бесконечность (рис. 117). Допустим, что положение точки A на этом пути определяется расстоянием l от начальной .точки O. В таком случае можем написать:

$$U = \int_A^\infty E \cos \alpha \, dl = \int_l^\infty E \cos \alpha \, dl.$$

Взяв частную производную от обеих частей этого равенства но нижнему пределу, получаем:

$$\frac{\partial U}{\partial l} = -E \cos \alpha$$

или

$$E \cos \alpha = -\frac{\partial U}{\partial l}.$$

Это означает, что составляющая электрической силы в данной точке по какому-либо направлению равняется взятой с обратным знаком производной потенциала по этому направлению. Так как направление *l* было избрано совершенно произвольно, то, обозначая
196

через E_x, E_y и E_z составляющие электрической силы E вдоль координатных осей, можем, следовательно, написать:

$$\left.\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial U}{\partial x} \\ E_y &= -\frac{\partial U}{\partial y} \\ E_z &= -\frac{\partial U}{\partial z} \end{aligned}\right\}, \qquad (38)$$

Если направление *l* изберем вдоль вектора *E*, то будем иметь:
$\cos\alpha=1$,
и соотношение (37) обращается в следующее:

$$E = -\frac{\partial U}{\partial l}.$$

Очевидно, в последнем случае мы имеем наибольшее возможное
значение $\partial U/\partial l$. знак минус показывает, что положительное направление вектора *E* есть то, в котором потенциал уменьшается.
Если направление *l* избрать перпендикулярно вектору *E*, т. е. положить: $\alpha=90^\circ$, то получим:

$$\frac{\partial U}{\partial l} = -E\cos 90^\circ = 0,$$

откуда получаем:
$U=\text{const}$
Отсюда следует, что, избрав направление *l*, перпендикулярное вектору *E*, мы перемещаемся вдоль поверхности уровня. Таким образом, приходим к заключению, что поверхности уровня нормальны по отношению к силовым линиям. И обратно, в каждой точке электрического поля электрическая сила *E* нормальна к поверхности уровня, проходящей через эту точку.
На основании всего изложенного, избирая за направление *l* направление вдоль нормали к поверхности уровня в данной точке, можем написать:

$$E = -\frac{\partial U}{\partial n}, \qquad (39)$$

т. е. электрическая сила в данной точке равна взятой с обратным знаком производной потенциала по нормали к поверхности уровня в этой же точке.
Величину $\partial U/\partial n$, т. е. наибольшее значение возрастания потенциала,
рассчитанное на единицу перемещения, называют *градиентом потенциала* и обозначают символом $\text{grad}U$. Таким образом,

$$\text{grad}\, U = \frac{\partial U}{\partial n}. \qquad (40)$$

197

Градиент потенциала есть вектор, направленный в сторону возрастания потенциала. Практически градиент потенциала выражают л *вольтах на сантиметр*.
Из сопоставления (39) и (40) получаем:

E=-grad$U$. (41)

з) *Теорема Гаусса.* Выведенная в глазе I теорема Гаусса для магнитного поля формально может быть распространена и на электрическое поле (см. примечание стр. 45). На основании указанного можем написать *для случая пустоты:*

$$\int_s E\cos\alpha\, ds = \frac{4\pi}{\varepsilon_0}\Sigma q = \frac{4\pi}{\varepsilon_0} Q$$

и для случая однородной и изотропной среды вообще:

$$\int_s E\cos\alpha\, ds = \frac{4\pi}{\varepsilon}\Sigma q = \frac{4\pi}{\varepsilon} Q$$

и) *Теорема Пуассона.* Допустим, что в однородной и изотропной среде с диэлектрической постоянной ε распределено электричество с объемною плотностью ρ, являющеюся функцией геометрических координат *x, y, z.* Рассмотрим теперь элементарный объем *dxdydz* и приложим к нему теорему Гаусса. Левую часть соотношения, изображающего эту теорему, можно представить состоящею из шести слагаемых, соответственно шести граням параллелепипеда *dxdydz.* Интересующие нас площадки будут равны *dydz* каждая, Если составляющая электрической силы *E* вдоль оси *x-ов* для всех точек одной из двух площадок есть E_x, то можно положить для этой площадки:

$E\cos\alpha = -E_x$.

В таком случае для другой площадки необходимо принять:

$$E'\cos\alpha' = E_x + \frac{\partial E_x}{\partial x} dx,$$

и часть интеграла:

$$\int_s E\cos\alpha\, ds,$$

соответствующая рассматриваемым двум площадкам, получит следующий вид:

$$-E_x\, dydz + \left(E_x + \frac{\partial E_x}{\partial x} dx\right) dydz = \frac{\partial E_x}{\partial x} dxdydz.$$

Подобным же образом найдем две другие суммы для двух остальных пар граней:

$$\frac{\partial E_y}{\partial y} dxdydz$$

и

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} dxdydz.$$

198

На основании этого, пользуясь теоремой Гаусса, можем написать:

$$\left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}\right) dxdydz = \frac{4\pi}{\varepsilon}\rho\, dxdydz.$$

Отсюда получим:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{4\pi}{\varepsilon}\rho. \qquad (42)$$

Полагая $\varepsilon=\varepsilon_0$ (для случая пустоты), приводим выражение (42) к виду:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}=\frac{4\pi}{\varepsilon_0}\rho, \qquad (43)$$

что собственно и составляет *теорему Пуассона.*

Принимая во внимание соотношение (38) пункта „ж" настоящего параграфа, можем ввести следующие преобразования:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x}=-\frac{\partial^2 U}{\partial x^2};\quad \frac{\partial E_y}{\partial y}=-\frac{\partial^2 U}{\partial y^2};\quad \frac{\partial E_z}{\partial z}=-\frac{\partial^2 U}{\partial z^2},$$

н соотношения (42) и (43) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=-\frac{4\pi}{\varepsilon}\rho; \qquad (42')$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=-\frac{4\pi}{\varepsilon_0}\rho. \qquad (43')$$

Сумму вторых производных какой-либо функции по трем переменным *x, y,* z принято обозначать знаком А. Тогда соотношения (42') и (43') можно представить так:

$$\Delta U+\frac{4\pi}{\varepsilon}\rho=0; \qquad (42'')$$

$$\Delta U+\frac{4\pi}{\varepsilon_0}\rho=0. \qquad (43'')$$

к) *Теорема Лапласа.* Во всех точках пространства, где объемная плотность электричества равна нулю, имеет место следующее соотношение:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}=0, \qquad (44)$$

которое, как это явствует из предыдущего, может быть представлено еще в следующих формах:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=0 \qquad (44')$$

199

или

$\Delta U=0$. (44")

Теорема Лапласа вытекает как следствие из соотношения (42), если в нем положить:

$\rho=0$.

Размерности электрических в магнитных величин.

1. Всякое электрическое и магнитное количество может быть выражено при посредстве основных единиц длины, массы и времени и специальных коэффициентов — диэлектрической постоянной ε и магнитной проницаемости μ, характеризующих свойства той среды, в которой имеют место электрические и магнитные явления. В нижеследующей таблице II в выведенных таким путем формулах размерности электрических и магнитных величин, ради достижения наибольшей общности, сохранены ε и μ. Полагая $\varepsilon=\varepsilon_0=1$, получим обычные формулы размерности так называемых абсолютных электростатических единиц. Полагая $\mu=\mu_0=1$, получим формулы размерности абсолютных электромагнитных единиц. Вместе с тем в таблице приведены те соотношения, которые необходимы для получения формул размерностей.

Отношение между абсолютной электромагнитной и абсолютной электростатической единицами количества электричества, обозначаемое обычно символом „c", имеет размерность скорости. Действительно, если основные единицы длины, массы и времени в обеих системах приняты одни и те же, то величину *„c"* можно представить себе как число абсолютных электростатических единиц количества электричества, содержащихся в одной абсолютной электромагнитной единице.

Следовательно, полагая ε=1 и μ=1, можем выразить размерность [c] следующим образом:

$$[c]=\frac{[L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}]}{[L^{1/2}M^{1/2}]}=[LT^{-1}]=[v].$$

Отметим еще, что размерность произведения магнитной проницаемости и диэлектрической постоянной, выраженных в одной и той же системе, будет следующая:

$$[\mu\varepsilon]=[L^{-2}T^{2}]=\frac{1}{(c^2)}.$$

444

В абсолютной электростатической системе мы принимаем, *что* размерность ε есть [0], и полагаем: $\varepsilon=\varepsilon_0=1$. Соответственно *этому* мы имеем в той же системе:

$\mu=1/c^2$.

В абсолютной электромагнитной системе размерность μ мы считаем равной [0] и полагаем: $\mu=\mu_0=1$. В связи с этим мы имеем в той же системе:

$\varepsilon=1/c^2$.

Таблица 1.

Наименования	Обозначения	Формулы размерности
ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ.		
Длина	l	$[L]$
Масса	m	$[M]$
Время	t	$[T]$
МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ.		
Скорость	$v = \frac{dl}{dt}$	$[LT^{-1}]$
Ускорение	$w = \frac{dv}{dt}$	$[LT^{-2}]$
Сила	$f = mw$	$[LMT^{-2}]$
Работа	$A = fl$	$[L^2MT^{-2}]$
Энергия	$A = \frac{1}{2}mv^2$	
Мощность	$P = \frac{A}{t}$	$[L^2MT^{-3}]$

445

Таблица II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ.

Наименования	Обозначения	Электростатическая система	Электромагнитная система
Количество электричества	$q = l\sqrt{\varepsilon f}$ $q = it$	$[\varepsilon^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}]$	. . . . . . $[\mu^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}]$
Электрическое смещение	$D = \frac{q}{s}$	$[\varepsilon^{1/2}][L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}]$	$[\mu^{-1/2}][L^{-3/2}M^{1/2}]$
Электрическая сила	$E = \frac{f}{q}$	$[\varepsilon^{-1/2}][L^{-3/2}M^{1/2}T^{-1}]$	$[\mu^{1/2}][L^{1/2}M^{1/2}T^{-2}]$
Электрический потенциал Электродвижущая сила	$U = \frac{A}{q}$ e	$[\varepsilon^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}]$	$[\mu^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}]$
Электрическая емкость	$C = \frac{q}{U}$	$[\varepsilon][L]$	$[\mu^{-1}][L^{-1}T^{2}]$
Диэлектрическая постоянная	$\varepsilon = \frac{4\pi}{E} D$	$[\varepsilon]$	. . . . . . $[\mu^{-1}][L^{-2}T^{2}]$
Сила тока	$i = \frac{q}{t}$	$[\varepsilon^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}]$	$[\mu^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}]$
Электрическое сопротивление	$r = \frac{e}{i}$	$[\varepsilon^{-1}][L^{-1}T]$	$[\mu][LT^{-1}]$
Количество магнитизма	$m = l\sqrt{\mu f}$ $f = \frac{im \sin \xi\, dl}{a^2}$	. . . . . . $[\varepsilon^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}]$	$[\mu^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}]$ . . . . .
Магнитная сила	$H = \frac{f}{m}$	$[\varepsilon^{1/2}][L^{1/2}M^{1/2}T^{-2}]$	$[\mu^{-1/2}][L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}]$
Магнитодвижущая сила	$F = \int H dl$	$[\varepsilon^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}]$	$[\mu^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}]$
Магнитная индукция	$B = \mu H$ $e = -\frac{d(Bs)}{dt}$	. . . . . . $[\varepsilon^{-1/2}][L^{-3/2}M^{1/2}]$	$[\mu^{1/2}][L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}]$ . . . . .
Магнитная проницаемость	μ $\mu = \frac{B}{H}$	. . . . . . $[\varepsilon^{-1}][L^{-2}T^{2}]$	$[\mu]$ . . . . .
Магнитный поток	$\Phi = Bs$	$[\varepsilon^{-1/2}][L^{1/2}M^{1/2}]$	$[\mu^{1/2}][L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}]$
Коэффициент самоиндукции Коэффициент взаимной индукции	$L = \frac{\Phi}{i}$ $M = \frac{\Phi}{i}$	$[\varepsilon^{-1}][L^{-1}T^{2}]$	$[\mu][L]$

Таблица III.

Наименования величин	Формулы размерности (по П. Л. Калантарову)
Магнитный поток	$[\Phi]$
Магнитная индукция	$[\Phi L^{-2}]$
Электродвижущая сила	$[\Phi T^{-1}]$
Электрическая сила	$[\Phi T^{-1} L^{-1}]$
Количество электричества	$[Q]$
Электрическое смещение	$[Q L^{-2}]$
Магнитодвижущая сила, сила тока	$[Q T^{-1}]$
Магнитная сила	$[Q T^{-1} L^{-1}]$
Электрическое сопротивление	$[\Phi Q^{-1}]$
Коэффициент электромагнитной индукции	$[\Phi Q^{-1} T]$
Магнитная проницаемость	$[\Phi Q^{-1} T L^{-1}]$
Магнитное сопротивление	$[\Phi^{-1} Q T^{-1}]$
Электрическая емкость	$[\Phi^{-1} Q T]$
Диэлектрическая постоянная	$[\Phi^{-1} Q T L^{-1}]$
Энергия, работа	$[\Phi Q T^{-1}]$
Мощность	$[\Phi Q T^{-2}]$
Механическая сила	$[\Phi Q T^{-1} L^{-1}]$
Масса (инертная)	$[\Phi Q T L^{-2}]$
Количество действия, момент количества движения	$[\Phi Q]$

2. П. Л. Калантаров предложил при выводе формул размерности электрических и магнитных величин принять за основные величины следующие четыре:
Время ..... [*T*]
Длина ..... *[L]*
Магнитный поток ..... *[Ф]*
Количество электричества . . . *[Q]*
Формулы размерности, получающиеся при указанном выборе основных величин, приведены в таблице III, в которую включены также размерности энергии, мощности, механической силы, массы (инертной) и момента количества движения, т. е. так называемого количества действия (постоянная *Планка h* есть некоторое элементарное количество действия).
448

[1]) P. Kalantaroff. Les equations aux dimensions des grandeurs electriques .et magnetiques. — Revue Generale de l'Electricite, 1929, t, XXV, № 7, p. 235.

Предметный указатель.

Абсолютная электромагнитная единица:
количества электричества 193,
коэффициента взаимной индукции 354,
коэффициента самоиндукции 342,343,
магнитного потока 47,
магнитной индукции 42,
магнитной массы 37,
силы (напряженности) магнитного поля 38.
Абсолютная электростатическая единица:
емкости 221,
количества электричества 193,
электрического потенциала 195.
Абсолютный электрометр 218.
Абсолютных единиц размерность 444-448.
Айртон, формулы для вольтовой дуги 285.
Ампера опыт 392.
Ампера правило 388.
Ампервитки 95.
Арматуры зубчатые 58, 81.
Асинхронная машина, ЭДС ротора 352.
— — электромагнитные взаимодействия 388.
Барнетта опыт 335.
Бархгаузена опыт 146.
Бесколлекторная машина постоянного тока 81-88,
Бифилярная обмотка 348.
Боковой распор магнитных линий 109—111, 377—379.
— — фарадеевских трубок 219.
— Бомбардировка ионная 256, 285, 293, 298, 305.
— Бонч-Бруевич, мощные генераторные лампы 304.
— Боргмана исследование потерь в диэлектрике 227.
— Брауна трубка 305, 306.
Вебера-Юинга гипотеза 140—146.
Вектор Пойнтинга 430—433.
Венельта оксидированный катод 301, 302, 305.
Вещества роль в явлениях магнитного поля 40, 125—129, 368-372.
Взаимная индукция 350—359.
Взаимной индукции коэффициент 352 — 359.
— —коэффициент, единица 354.
— — коэффициент, определение 354.
— — коэффициент тороида 355—356.
— — поток 350, 353, 360.
— -ЭДС 350-352, 363.
Взаимодействие магнитных полюсов 36, 37.
Взаимодействие токов 377—381.
Вибратор 419—426.
Вильсон, конденсация влаги на ионах 262.
Вин, масса иона 261.
Вихревые нити Гельмгольца 63, 64.

Внешняя ЭДС 203.
Внутренняя ЭДС 200—203.
Внутриатомные токи 146,147,368—372.
Воздуха диэлектрическая постоянная 225.
— электрическая прочность 229—230
Волна плоская 411.
— — уравнение 412.
— стоячая 425.
Вольт 195, 247.
Вольтова дуга 266, 281--291.
— —, кратер 283.
— —, характеристики 286—290.
Восприимчивость магнитная 42, 125.
Вращающихся магнитов гипотеза 140
Вторичной цепи роль 362—365.
Вторичные электроны 256.
Выпрямление переменного тока 88, 291—296.
Выпрямители дуговые, ртутные 291 — 296.
— катодные, кенотроны 305.
Вязкость диэлектрическая 225—227.
— магнитная 157, 158,
Гааса (де-) и Эйнштейна опыт 335.
Гаусс (единица) 42.
Гаусса теорема для магнитного воля 42-45.
— — для электрического поля 45, 198,
Гельмгольца вихревые нити 63, 64.
Генри (единица) 343, 354.
Геринга работы 385, 394.
Герц, фотоэффект в искре 279.
Герца опыты 419—426.
Гипотеза молекулярных магнитов 140
-147. Гистерезис магнитный 132—140,
— вращения 160, 161.
— диэлектрический 227, 228.
Гистерезис, потери 135—140, 160—163.
— — вывод 135-139.
— — формула Штейнметца 139—140.
— цикл (петля) 131 — 135.
Гопкинсона опыты 149 — 150, 153—155,
Градиент потенциала 196—198.
— — критический 274—276.
Громоотводы 277—278.
Давление газа, влияние и» разряд 263, 267, 296, 297.
Даламберова сила инерции 117,118,326.
Движение проводника во внешнем магнитном поле 70-74, 385-389.
— электричества внутри проводников 234-236.
Движения электродинамической системы закон 372-377, 387, 389-394.
Действие на расстоянии 7. 8, 17—23. 32, 33.
Действующий коэффициент взаимной индукции 372.
Действующий коэффициент самоиндукции 366—372.

— динамический 371, 372,
— статический 368.
Детектор магнитный 152.
— Флеминга 303.
.Деформации расслабление (реляксация)237.
Деформация среды электрическая 176, 204, 211, 213, 217, 226.
— среды остаточная 226.
Деформирование магнитных линий 63-74.
Диамагнитное вещество 40, 42, 370.
Динамический коэффициент самоиндукции 371, 372.
Диск Фарадея 49, 81
Дисковая униполярная машина 82,
Дифференциальные ур-ия Максвелла 406-407.
Диэлектрическая вязкость 225—227.
Диэлектрический гистерезис 227—228,
Диэлектрическая постоянная 171, 193, 224-225, 414-418.
— — различных диэлектриков 225, 418,
Диэлектриков проводимость 228,
— свойства 224-230.
Добавочная скорость магнитных линий
77—79.
Дуга вольтова 266, 281—291.
Дуговые выпрямители 291—296.
Единица абсолютная электромагнитная:
количества электричества 193,
коэффициент» взаимной индукции 354,
коэффициента самоиндукции 342, 343,
магнитной индукции 42,
магнитной массы 37,
магнитного потока 47,
магнитной силы 38.
Единица абсолютная электростатическая:
емкости 221,
количества электричества 193,
электрического потенциала 195.
Единица практическая:
градиента потенциала 198,
емкости 221,
количества электричества 193,
коэффициента взаимной индукции 354,
коэффициента самоиндукции-342,343,
магнитного потока 47,
потенциала электрического 195.
Единиц размерность 444—448.
Единичная трубка магнитной индукции 47.
— — электрического смещения (фарадеевская трубка) 207, 208.
Емкость (электрическая) 220—224.
Емкость конденсатора 222, 224.
— шара 221.
Железо;

изменение размеров при намагничении 159,
коэрцитивная (понудительная) сила 133, 135,
коэффициент Штейнметца 139,
кремнистое 140, 161—163,
кривая намагничения 87, 130, 132,
кривая μ 148, 153, 154, 163, 164,
критическая температура 154,
потери на гистерезис 135 — 140 160-163,
сплавы 161—164,
старение 156,
удельное сопротивление 162.
Задерживающая сила 133, 135.
Закон Био-Савара 388.
— движения электродинамической системы 372-377, 387, 389-394.
— Кулона 36, 37, 192, 193.
— Ленца 121, 365.
— магнитной цепи 94—97.
— магнитной цепи, аналитическое выражение 94—95.
— магнитодвижущей силы 89—93, 402.
— Ома 95, 236.
— Пашена 279.
— Ричардсона 301, 302.
— электродвижущей силы 200, 402.
— электромагнитной индукции: формулировка Максвелла 57,
формулировка Фарадея 55—57,
тождественность обеих формулировок 58—62.
Залесского, формулы для вольтовой дуги 286.
Замкнутость (непрерывность) магнитного потока 47—55.
— —математическая формулировка 52-55.
Замкнутость (непрерывность) электрического тока 168, 172, 179—181.
— — математическая формулировка 179-181.
— — примеры 182—189.
Запас энергии магнитного поля (на единицу объема) 97—100.
— — потока самоиндукции 100—102, 244»
— — системы наэлектризованных тел 213- 216.
— — электрического поля (на единицу объема) 171, 216.
Заряд электрический 166,193,208, 232.
— иона, электрона 208, 256—263.
— объемный (в газах) 273, 301.
— остаточный 225—227.
Затухание электрических колебаний 422.
Звенья магнитные 71, 72, 242 - 248.
— энергия одного звена 101, 248.
Зворыкина работы по телевизии 306.
Зубчатые арматуры 58, 81.
Измерение магнитного потока (флюксметр) 121—124.
Изоляторы:
диэлектрическая постоянная 193, 225.
потери на диэлектрический гистерезис 227, 228.
удельное сопротивление 228,

электрическая прочность 228—230.
Индукция взаимная 350-360.
— — ее коэффициент 352—360,
— — ее единица 354,
— — ее определение 354,
— — ее поток 350, 355, 360,
— — ее ЭДС 350—352, 362.
Индукция магнитная 40, 47, 125.
Индукции магнитной, ливни 46,
— — трубка 46.
Индукция электромагнитная: ее механизм 70—74, 246, 247,
Максвеллова формулировка 57, 62,
Фарадеева формулировка 56 — 57,
тождественность обеих формулировок 58—62,
формулировка автора 247.
Инерции сила (Даламберова) 117, 326.
Инерция магнитного потока 115-124.
— электрического тока 309.
Интеграл линейный магнитной силы
89-93.
— — электрической силы 194, 200—204.
Ион 250-252.
Иона заряд 256—263.
— масса 256-263.
Ионизация газа 252—256.
Ионизирующие агенты 252—256. .
— — рентгеновы лучи 250, 253, 255.
— — ультрафиолетовые лучи 253, 255 279.
— — излучения радиоактивных веществ 253-255.
— — космические лучи 253.
— — электрическое поле 253, 254, 265-267, 274—276.
— — высокая температура газа 253.
— — высокая температура твердых и жидких тел 254, 266, 298—301.
- — коллизии, т. е. соударения 253-255.
- — фотоэлектрический эффект 254, 255, 279.
— — химические реакции 255.
— — деформирование поверхности жидкости и твердого тела в атмосфере газа 255.
— — ионная бомбардировка 256, 285. 293, 297, 305.
Ионизирующий потенциал 254.
Ионов концентрация 268—274.
— подвижность 269—273.
— рекомбинация 252, 268, 273, 274.
Иоффе изолятор 230.
— элементарный фотоэффект 255.
Искра 266, 277-280. Искровой телеграф 279.
Калантаров, размерности физических величин 447—448.
Катод оксидированный Венельта 301. 302. 305.
Катодная лампа 303—305.
Катодные лучи 256—260, 298, 305.

Катодный осциллограф 305—306.
Кельвина (В. Томсона) электрометр 218
Кинетическая природа тока 231—234 308, 313.
Кинетическая энергия системы в обобщенных координатах 320—321.
Кобальт (магнитные свойства) 130, 135, 140, 148, 154, 159.
Количество движения в электрокинетическом процессе 339—311, 337. 347, 360.
Количество электричества: единица 193.
связанное с фарадеевской трубкой 208.
Коллизии, т. е. соударения, как ионизирующий агент 253-255.
Кольцо охранное 103, 217.
Конденсатора емкость 222, 224.
Конвекционный ток 179, 182—185, 188.
— — его замкнутость 182—185,
Концентрация ионов 268—274.
Координаты обобщенные 318—324.
— электрические 322—324.
Корона 274—277.
Космические лучи 253.
Коэрцитивная (понудительная) сила 133, 135.
Коэффициент взаимной индукции 352-359.
— — действующий 372.
— — единица 354. — — определение 354.
— — тороида 355, 356.
Коэффициент полезного действия электромагнитного механизма
374. Коэффициент самоиндукция 117, 338-349, 358.
— — величина его 341—349.
— — действующий 366—372.
— — Динамический 371, 372.
— — статический 368 - 371.
— — единица 342, 343.
— — изменение величины 347, 349, 366.
— — синхронно изменяющийся 84-88.
— — тороида 345—347.
— — эквивалентный 365.
— — эффективный 365. Коэффициент Штейнметца 139.
—электромагнитной связи 357—359.
Кратер вольтовой дуги 283.
Кремнистое железо 140, 161—163.
Кривая намагничения 87, 130—132, 150.
Критический градиент потенциала 274—276.
Критическая температура 154.
Крукс, катодные лучи 256.
кулон (единица) 193.
Кулона закон 36, 37, 192, 193.
Лагранжа уравнения, 1-я форма 316, 317.
— — 2-я форма 317 -320.
Лампа катодная 303—305.
Лапласа теорема 199, 200, 410.
Лебедев, опыт с вращением медного цилиндра 336.

Лебединский, обратный фотоэффект в искре 279.
Ленард, ионизация воздуха при разбрызгивании воды 255.
Ленца закон 121.
Линейный интеграл магнитной силы 89-93.
— — электрической силы 194, 200— 204.
Линии магнитные 35, 46, 47, 55—80,
100 -115, 426.
Линий магнитных боковой распор 109, 110. 377—381, 387.
— — деформирование 63—75, 109.
— — непрерывность 47—55.
— — механизм перерезывания 70 — 74,
— — почкование 71—74.
— — преломление 111—115.
— — преобразование 63—74.
— — скорость добавочная 77—79.
— —тяжеиие 102-109, 377-387.
— — энергия 100, 104.
Линии электрического поля 194.
— — смещения 204.
Магнит, подъемная сила его 105,
— постоянный 50, 152. 397.
Магнитизм остаточный 132, 134, 137,
Магнигизма плотность поверхностная 40, 127—128.
Магнитная восприимчивость 42, 125.
— вязкость 157, 158.
— индукция 40, 125.
Магнитная индукция, поток ее 46, 47;
— — трубка ее 46.
—-масса 37, 38.
— — единица ее 37.
— — фиктивность ее 38, 126—129.
—-проницаемость 42, 125, 127—129 130, 143, 153, 154, 163, 164, 370, 414. 415,
— — кривая ее 148, 153, 154, 163, 164.
— — предел ее 148.
— сила 38—40.
— — линейный интеграл ее 89—93.
— — внутри соленоида 93.
— цепь 88-97.
Магнитное поле 36, 127, 165—168, 403,
— — сила (напряженность) его 38—40.
— — определение 35.
Магнитное рассеяние *96,* 106,
— сопротивление 95—97.
Магнитные единицы, размерность их 444—448.
Магнитные звенья 71, 72, 242—248.
Магнитные линии 35, 46, 47, 55—80, 100-115, 426.
— — боковой распор 109, 110. 377— 381, 387.
— — деформирование 63—75, 109.
— — непрерывность 47—55.
— -- перерезывание 70—74.

— —почкование 71—74.
— —преломление 111 — 115.
— — преобразование 63—74.
— — тяжение 102—109, 377-387.
— — энергия 100, 101.
Магнитный момент 39.
Магнитный поток 36, 46—55, 94—100, 115-124, 360. 361.
— — единица 47.
— — непрерывность его 47—55.
— — измерение его 121 —124.
— — инерция его 115—121.
— — определение его 36, 46—47. — 342—347.
— — положительный и отрицательный 389.
— —постоянство его 115—121.
— — реально-существующий 342—346.
— — сквозь поверхность 46.
— — число сцеплений 342—344.
— — энергия его 97-100, 243-248, 429.
Магнитный спектр 46, 69, 107.
Магнитный цикл 131—135.
Магнитный экран 75—81.
Магнитных полюсов взаимодействие 36,37.
Магнитных потенциалов разность 90.
Магнитов вращающихся гипотеза 140 -147.
— постоянных изготовление 152.
Магнитодвижущей сила 89—97, 165.
Магнитопровод 88—97.
Максвелл (единица) 47. ,
Максвелла опыты (F_{me} и e_{me}) 327— 336.
— теорема 174-176, 209, 210.
— уравнения электромагнитного поля 402-407.
Максвеллова формулировка закона электромагнитной индукции 57.
Масса иона 256—263.
— магнитная 36, 37, 126—129.
— электрона 260.
Материалы ферромагнитные 40, 130 140, 161-164, 370.
Машина бесколлекторная постоянного тока 81—88.
Машина асинхронная 352, 388.
Машина постоянного тока, ЭДС якоря 352.
— синхронная, ЭДС якоря 352.
— униполярная 49, 82.
Маятник электрический 185.
Мельсана громоотвод 277, 278.
Металлические массы, уравнение распределения тока в них 440.
Механизм возникновения электромагнитной силы 107—109.
— перерезывания магнитных линий 70-74.
— электромагнитной индукции 70—74.
Механизмы электромагнитные, к.п.д. их 374.
Механическая электромагнитная сила (см. Электромагнитная сила).

Микрофарада 221.
Милликен, заряд электрона 263.
Молния 266, 277—279
Момент количества движения в электрокинетическом процессе 337, 3б0.
Момент магнитный 39.
Намагничения кривые 87, 130—132.
Напряженность (сила) электрического поля 194.
Напряжение электрическое 203.
— пробивное 228—230, 280, 281.
— Напряженность (сила) магнитного поля 38-40.
— — внутри соленоида 93.
Напряженность намагничения 39—40, 125-127, 148.
Насыщение магнитное 147—149.
Насыщения ток 264, 271, 301, 302.
Непрерывность см. замкнутость.
Неразрывность магнитных линий 55.
Никкель (магнитные свойства) 130, 148, 152, 159, 163, 164.
Нити вихревые Гельмгольца 63, 64.
Ньютонова сила механическая 118.
Обмотка бифилярная 343.
Обобщенные координаты 318—324,
— силы 318-320.
— скорости 319—320.
Объемный заряд 273, 301,
Озонатор 277.
Оксидированный катод Венельта 301, 302, 305.
Ома закон 95, 236.
Опыт автора 61, 283—284.
—Ампера 392.
— Барнетта 335. — Бархгаузена 146.
—Герца 419-426
— Гопкиисона 149—150, 153—155.
— Максвелла *(F_{me}* и *e_{me})* 328—336.
— Фарадея 47-52,127-129,212-213, 224
— Эйнштейна и де-Гааса 335.
— Эйхенвальда 183.
— Юинга 143-145, 157, 158.
Основная кривая намагничения 132, 152.
Остаточный заряд 225-227.
Остаточная электрическая деформация 228.
Осциллограф катодный 305—306.
Отражение электромагнитных волн 426.
Отрицательный (южный) полюс магнитный 126-129.
Отрывной пермеаметр 106—107.
Охранное кольцо 103, 217.
Пашена закон 279.
Парамагнитные вещества 40, 42, 128, 370.
Перерезывание магнитных линий 57, 70-74.
Период электрических колебаний 423.
Пермаллой 164.

Пермеаметр отрывной 106—107.
Петля гистерезисная 131—135.
Петров, открытие вольтовой дуга 281.
Пинч—эффект 392.
Плоская волна 411.
— — уравнения ее 412.
Плотность магнитизма поверхностная
40, 127-128. Поверхностный эффект (skin-effect),
определение 434
— — уравнения 433—443.
Поверхность равнопотенциальная 196, 197, 202, 239-240.
Подвижность ионов 269—270, 273.
Подъемная сила магнита 105, 106.
Пойнтинга вектор 430—433.
Пойнтинга теория распространения электромагнитных возмущений 426-433.
Пойнтинга и Дж. Дж. Томсона теория электрического тока 236—242.
Показатель преломления (света) . 417, 418.
Поле магнитное 36, 127,165—168, 403.
— — сила (напряженность) его 38—40.
— — определение 35.
— — энергия 97—102.
Поле электрическое 190—192, 401.
— — сила (напряженность) его 194.
— — силовые линии 194.
— энергия 171, 213—216, 429.
Поле электромагнитное 166, 400—402.
— — вывод уравнений 402—407.
— — в диэлектрике 409
Поле электромагнитное в проводнике 433-443.
— — кинетический характер его 401, 402.
— —определение 166, 402,
— — уравнения его 406 — 409,
— — энергия 429— 433.
Поле электростатическое 190—192,194,
201, 202. Положительный (северный) полюс магнитный 38, 126-129.
Полюса магнитные 126—129.
Полюсов магнитных взаимодействие
36, 37.
Поляризация электрическая 169.
Полярность магнитных линий 35.
Пондеро-кинетическая энергия 324, 325,
— электрокинетическая энергия 324-336.
Понудительная (коэрцитивная) сила 133-135,
Постоянная диэлектрическая 193, 225, 414-418.
— — для равных диэлектриков 225,
418. Потенциал ионизирующий 254.
— прорыва 500.
— электрический 194—196, 202, 215.
Потенциала градиент 196—198,
— единица 195.

Потенциалов магнитных разность 90.
— электрических разность 200—203, 218, 222-223.
Потенциальная функция 195, 196.
Потери на гистерезис:
диэлектрический 227, 228.
магнитный 132—140.
Поток взаимной индукции 350, 353, 360
Поток магнитный 36, 46-55, 94- 100, 115-124, 360, 361.
— — единица 47.
— — непрерывность его 47—55.
— — измерение его 121—124.
— —инерция его 115—121.
— — определение 36, 46, 47.
— — полный 342—347.
— — положительный и отрицательный 389.
— — постоянство его 115—121,
— — реально-существующий 342—346.
— — сквозь поверхность 46.
— — число сцеплений 342—344.
— — энергия 97-100, 243-248, 429.
Поток самоиндукции 101, 117, 247, 339-349, 360.
— — полный 344, 347.
— — число магнитных звеньев 247.
— — энергия его 101,102,242 — 245,339.
— Поток электромагнитной энергии, мощность его 430-433.
Почкование магнитных линий 71—74.
Правило правой руки 51.
Практические единицы:
градиента потенциала 198.
емкости 221.
количества электричества 193
коэффициента взаимной индукции 354.
коэффициента самоиндукции 342,343.
магнитного потока 47.
Прамаксвелл 47.
Преломление магнитных линий 111 — 115.
— фарадеевских трубок 219, 220,
— электромагнитных волн 426.
Преломления показатель 417—418.
— — зависимость его от частоты 418.
— — для различных диэлектриков 418.
Преобразования магнитного потока 63—74, 379.
Принцип непрерывности магнитного потока 47—55.
— — формулировка его 52—55.
Принцип непрерывности электрического тока 172, 179-181.
— — формулировка его 179—181.
— — примеры 182—189.
Принцип инерции магнитного потока 115-124.
— — формулировка его 121.
Природа электрического тока 231 —248.

— — теория автора 242—248.
— — теория Дж. Дж. Томсона и Пойнтинга 236-242.
Природа электромагнитной силы 107—109, 387.
Пробивное напряжение 228—230, 280, 281,
Пробой диэлектриков 228—230.
Проводимость диэлектриков 228.
Проводника движение во внешнем магнитном поле 70—74, 385—389.
Проводника потенциал 202.
Проводника роль в передаче электромагнитной энергии 232—234, 431—433.
Проводов транспозиция 359, 360.
Проницаемость магнитная 42, 125,
127-129, 130, 148, 153, 154, 163,
164, 370, 414, 415. Прочность электрическая 228—230.
— — различных диэлектриков 230.
Прэстона теория 51, 52.
Пуассона теорема 198, 199, 202.
Работа намагничения 98-100, 135-
139, 143. Работа электромагнитной силы 373-376,391, 396.
Равнопотенциальная поверхность 196, 197, 202, 239-240,
Радиоактивных веществ излучения 253, 254, 255.
Размерности электрических а магнитных единиц 444—448.
Размеров тела изменение при намагничении 159.
Разность магнитных потенциалов 90.
Разность потенциалов (электрических) 200—203, 218, 222, 223.
Разряд разрывной 228, 266, 277—281.
— тихий 265, 274-277.
Разрядник шаровой 280, 281.
Распор боковой магнитных линий 109—111, 377—379, 387.
— — фарадеевских трубок 219.
Рассеяние магнитное 96. 109.
Расслабление деформации (реляксация) 237.
Резонатор 424.
Рекалесценция 156.
Рекомбинация ионов 252, 268, 273, 274.
Реляксация 237.
Рентгеновы лучи 250, 253, 255, 306 — трубки 306.
Ричардсона закон 301, 302.
Роль проводника в передаче электромагнитной энергии 232—234, 431— 433.
Роль среды в магнитных и электрических явлениях 8,19-22, 29—36, 171, 198, 204, 231-248, 433.
Ртутные выпрямители 291—296.
Самоиндукция 247, 309.
— в цепях постоянного тока 349.
Самоиндукции коэффициент 101, 117, 244, 338—349, 358, 366.
— — величина его 341—349.
— — действующий 366—372.
— — — динамический 371.
— — — статический 368—371.
— — единица 342, 343.
— — изменение величины 347, 349, 366.
— — синхронно изменяющийся 84— 88.

— — тороида 345 -347.
— — эквивалентный 365.
— — аффективный 365.
Самоиндукции поток 101, 117, 247. -339--349, 360
— — полный 344, 347.
— — число магнитных звеньев 247.
— — энергия его 101,102,242—245,339.
Самоиндукции ЭДС 87, 98, 118, 119 247, 338-340, 362.
Сантиметр (единица емкости) 221.
Сверхпроводник 119. 120, 243—245, 382-385.
Света скорость 416, 417.
Свойства диэлектриков 224—230.
— магнитных материалов 125—164.
Связи электромагнитной коэффициент 357 - 359.
Северный (положительный) полюс магнитный 38, 126-129.
Семичев, основные электродинамические процессы 374.
— — и Чернышева Е. А,, критика работ Геринга 385, 394.
Сила задерживающая (коэрцитивная) 133, 135.
Сила инерции 117, 326.
Сила (напряженность) магнитного поля 38-40.
— — внутри соленоида 93.
Сила магнитодвижущая 89—97, 165.
Сила Ньютонова 118.
Сила обобщенная 318—320.
— подъемная магнита 105, 10б.
— (напряженность) электрического поля 194.
— электромагнитная см. электромагнитная сила.
Силовые линии магнитного поля 33—36, 47.
— электрического поля 194. Силы магнитной линейный интеграл 89—93.
— — электрической линейный интеграл 194, 200-204.
— электрического тока мера 90, 165.
— электромагнитной природа 107—109,
Синхронная машина, ЭДС якоря 352
Синхронное изменение коэффициента самоиндукции 31—88.
Skin-effect 433-443.
Скорости обобщенные 319, 320.
Скорость добавочная магнитных линий 77-79.
Скорость распространения электромагнитной энергии 414, 415.
— — величина ее 414
Скорость света 416, 417.
Слепян, проблема униполярной индукции 52.
Слияние магнитных линий 64—74.
Смещение электрическое 165 —189, 204-210.
— — величина его 169, 173, 209.
— — сквозь поверхность 170, 176, 209.
— — сквозь поперечное сечение трубки 207, 208.
Смещения ток 169-174, 179-189, 298, 406, 428.
— — электрического линии 204, 205.
— — трубки 205-220.
Сопротивление магнитное 95— 97.

— удельное диэлектриков 228.
— удельное железа 162.
Сотрясений влияние на магнитные свойства материалов 149 — 152.
Спектр магнитный 46, 69, 107.
Сплавы железа 161 —164,
Среды роль 8; 19-22, 29-36, 171, 198, 204, 231-248, 433.
Сталь:
гистерезисная кривая 134.
коэрцитивная (задерживающая) сила 135.
коэффициент Штейнметца 140.
кривая μ 143.
Старение железа 156.
Столетов, фотоэлектрический эффект 254, 279.
Стоячая электромагнитная волна 425.
Сцеплений число 342—344.
Телевизия 306.
Температура критическая 154.
Температуры влияние на магнитные свойства 152-157.
Теорема Гаусса для магнитного поля 42-45.
— — для электрического поля 45, 198.
— Лапласа 199, 200, 410.
— Максвелла 174—176. 209, 210.
— Пуассона 198, 199, 202.
— Фарадея 210—213.
Термионы 254, 266, 298, 299.
Тихий разряд 265. 274-277.
Ток насыщения 264, 271, 301, 302.
Ток смещения 169-174, 179-189, 298,406, 428.
Ток электрический конвекционный 179 182-185, 188.
— — мера силы его 90, 165.
Ток электрический проводниковый 172, 179, 232-248, 405.
Тока электрического непрерывность 168, 172, 179-181.
— — — математическая формулировке 179-181,
— — —примеры 182—189.
Тока инерция 309.
Тока кинетическая природа 231—234 308-313.
Токи внутриатомные 145,147, 368—372.
Токов взаимодействие 377—381.
Томсона Дж. Дж. и Пойнтинга теория механизма электрического тока 236 —242.
Томсон Дж. Дж., ионизация гага 251, 252.
— заряд и масса нона 256—263.
Томсона (Кельвина) формула периода ал. колебаний 423.
— электрометр абсолютный 218.
Тороид 98, 345, 355.
Транспозиция проводов 359, 360.

Трансформатор, механизм электромагнитной индукции в нем 75.
Трубка магнитной индукции 46.
— единичная 46.
— — ее энергия 101.
Трубка фарадеевская 207—210.
—— — ее энергия 215,
Трубка электрического смещения 205—216.
Трубок фарадеевских боковой распор 219
— — преломление 219, 220.
— —тяжение 216-219, 229.
Тяжение магнитных линий 102 — 109, 377-387.
— фарадеевских трубок 216—219.
Удельное сопротивление железа 162.
— — изоляторов (диэлектриков) 228.
Ультрафиолетовые лучи 253, 255, 279
Униполярная машина 82.
Упругости свойства магнитных линий 35, 102.
Уравнения Лагранжа, 1-я форма 316, 317.
— - 2 я форма 317—320.
— Максвелла 402—407.
Уровня поверхность 196, 197, 202, 239—240.
Фарада 221.
Фарадеевская трубка 207—210.
— — боковой распор 219.
— количество электричества с нею связанное 208.
— —преломление 219, 220.
— — энергия 215.
— — тяжение 216-219, 229.
Фарадея диск 49, 82.
— опыты 47—52, 127—129, 212—213, 224.
— теорема 210—213.
Фарадеева формулировка закона электромагнитной индукции 55—57.
Ферромагнитные материалы 130—140, 161-164, 370.
Физические силовые линии (магнитные линии) 33—36, 47, 50,64.
Фиктивность магнитных масс 38, 126-129.
Флеминга детектор 303,
Флюксметр 121—124.
Форест (Ли де), катодная усилительная лампа 303.
Формулы для вольтовой дуги: Герты Айртон 285.
Залесского 286.
Ноттингема 286.
Фрелиха (Эдлунда) 285.
Штейнметца 286.
Формула Штейнметца для потерь на гистерезис диэлектрический 227.
— — — на гистерезис магнитный 139—
140. Фотоэлектрический эффект. 254, 255, 279.
Фотоэлектроны 254.
Фотоэффект в искре 279.
Франклина громоотвод 277.

Характеристики вольтовой дуга 286-290.
Хвольсон, теорема Фарадея 212.
Хивизайда система единиц 44.
Химические реакции как ионизирующий агент 255.
Цепи вторичной роль 362—365,
— магнитной закон 94—97.
— магнитной сопротивление 95—97,
Цепь магнитная 88—97.
Цикл магнитный 131—135.
Чернышев А, *А.*, электрометр абсолютный 218, 275.
Чернышева Е. А. и Семичев, критика работ Геринга 385, 394.
Число сцеплений (потока) 342—344.
Чугун, магнитные свойства 130, 148,
Шара емкость 221.
Шаровой разрядник 280, 281.
Шателен, естественная ионизация воздуха в районе линий передачи энергии 278. 279.
Штейнметц, формула для вольтовой дуги 286.
— — для потерь на гистерезис магнитный 139, 140.
— — — диэлектрический 227
Эдисона эффект 298, 299. ЭДС 57, 200-204, 247, 331-333, 336, 338-365.
— взаимной индукции 350—352, 363.
— — — величина ее для случая двух контуров 350—352.
— внешняя 203.
— внутренняя 200—203.
— индукции 56-62, 73-77, 2СО, 247, 338-365.
— полная 200—204.
— самоиндукции 87, 98, 118, 119, 247, 338-340, 362.
— — *в* цепях постоянного тока 349.
Эйнштейна и де-Гааса опыт 335.
Эйхенвальда опыты 183.
Эквивалентный коэффициент самоиндукции 365.
Экранирование магнитное 75—81.
Электризация через влияние 210—212.
Электрическая деформация 176, 204,
211, 213, 217, 226.
— — остаточная 226.
— поляризация 169.
— прочность 228—230.
— — диэлектриков 229.
— сила 194.
— — ее линейный интеграл 194,
300—204. Электрические единицы, размерность их 444-448.
— колебания, затухание их 422.
— — период 423.
— координаты 322—324.
Электрический заряд 166, 193, 208, 232.
— — остаточный 225—227.
— маятник 185.
— потенциал 194-196, 202, 215.
— — единица его 195.

Электрический ток, непрерывность (замкнутость) его 168, 172, 179— 181.
— — инерция 309.
— — количество движения 309—311, 337, 347.
— —конвекционный 179, 182 — 185, 188.
— мера силы его 90, 165.
— —природа его 231—248.
— — проводниковый 172. 179, 232— 248, 405.
— —смещения 169 — 174, 179—189, 298, 406, 428.
Электрических токов взаимодействие 377-381.
Электрическое напряжение 203.
Электрическое поле 190—192, 401.
— как ионизирующий агент 253, 254, 265-267, 274—276.
— — сила (напряженность) его 194.
— — силовые линии 194.
— — энергия 171, 213-216, 429.
Электрическое смещение 165 — 189, 204-210.
— — линии его 204,205.
— — трубка 205—220.
Электродинамические взаимодействия сверхпроводников 381—385.
Электродинамическая система, закон движений 372—377, 387, 389—394.
Электроемкость 220—224.
Электрокинетическая энергия 244.245, 324, 337-338.
— — двух контуров 350, 383.
— — одного контура 339.
— — определение 324.
Электромагнитная волна: отражение 426,
плоская 411,
преломление 426,
стоячая 425.
Электромагнитная единица абсолютная;
количества электричества 193.
коэффициента взаимной индукции 354,
коэффициента самоиндукции 342, 345
магнитной индукции 42,
магнитной массы 37,
магнитного потока 47.
Электромагнитная единица абсолютная
— силы (напряженности) магнитного поля 38.
Электромагнитная единица практическая:
градиента потенциала 198, емкости 221,
количества электричества 193, коэффициента взаимной индукции 354,
коэффициента самоиндукции 342,343,
Электромагнитная индукция:
закон ее, формулировка Максвелла 57, 62,
формулировка Фарадея 55—57, 62,
тождественность обоих формулировок 58-62,
формулировка автора 247,
механизм 70-74, 246, 247.
Электромагнитные механизмы, к. п. д. их 374.
Электромагнитное поле 166, 400 — 402.

— — вывод уравнений 402—407.
— — кинетический характер его 401, 402.
— —определение 166, 402,
— — распространение в диэлектрике 409-415.
— — распространение в проводнике" 433-443.
— — скорость распространения 414— 415, 428, 429.
— —уравнения (Максвелла) 402—407,
— — энергия 429—433.
Электромагнитная связь, коэффициент ее 357—359.
Электромагнитная сила 81, 121, 327, 372-399.
— —величина ее 81, 121, 373, 380.
— — — в частных случаях 390—393, 394-399.
— — природа ее 107—109, 387. — — работа ее 373-376, 391, 396.
— — физическая картина возникновения 72, 385.
Электромагнитная анергия: механизм движения 423—433.
Электромагнитная энергия:
— —мощность 430-433.
— — распространение 409 — 415 426.
— — скорость распространения 414, 415, 428, 429.
Электромагнитных единиц размерность 444—448.
Электрометр абсолютный В. Томсона (Кельвина) 218.
— Чернышева А. А. 218, 275.
Электроны 166-168, 208, 235, 249, 252, 260-263, 282, 285, 298-307.
— вторичные 256.
Электронная эмиссия 301, 302.
Электростатическая единица абсолютная:
емкости 221,
количества электричества 193,
электрического потенциала 195.
Электростатических единиц размерность 444—448.
Электрическое поле 190—192, 194, 401.
Элементарные магниты 140—147,
Эмиссия электронная 301, 302.
Энергия кинетическая в обобщенных координатах 320—321.
Энергия магнитного поля (потока)
97-100. Энергия магнитного поля на единицу
объема 99, 100.
— — на одну магнитную линию 101.
Энергия магнитного потока самоиндукции 101, 102, 242—245.
Энергия системы наэлектризованных тел 213-216.
Энергия электрического поля 171, 213-216, 429.
— — на единицу объема 171, 216.
— — на одну фарадеевскую трубку 215.
Энергия электрокинетическая 244,245, 324, 337, 338.
Эрстед (единица) 38.
Эффект поверхностный (skin-effect) 434.
— Эдисона 298, 299.
Эффективные (действующие) коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции 366—372.
Южный (отрицательный) полюс магнитный 126—129.
Юинга (Вебера-) гипотеза 140—147,

Юинга опыты 143—145, 157, 158.

МИТКЕВИЧ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ

1. Речь, читанная в торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 года).

2. Основные физические воззрения

ВВЕДЕНИЕ.
ОСНОВНЫЕ ВОЗЗРЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ
(Речь, читанная в торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 года).

1. Основные воззрения научной дисциплины представляют глубокий интерес как с чисто философской точки зрения, так и в отношении перспектив, открывающихся на пути дальнейшего развития этой дисциплины. Некоторый анализ господствующих воззрений можно признать особенно целесообразным при обозрении наук, которые достигли уже высокой степени развития благодаря большому накопленному материалу, но в то же время встречают какие-либо затруднения в его надлежащем освоении и теоретическом сведении в стройное целое. Современная физика, являясь основной, ведущей наукой о природе в самом широком смысле этого слова, располагает по истине гигантским материалом опытного и теоретического характера. Вместе с тем, однако, быть может, именно благодаря обширности и универсальности современной физики и ее проникновению во все другие теоретические и практические дисциплины, ведущие человечество к овладению силами природы, в значительной степени остро ощущаются: недостаток общих, признанных всеми руководящих идей, которые могли бы способствовать созиданию единой стройной картины физических явлений, и желательность более или менее отчетливого освещения элементов противоречия, повидимому, обнаруживающегося в некоторых случаях. На этой почве возникло не очень, однако, ясно оформившееся тревожное настроение, выразившееся, между прочим, в указаниях на симптомы кризиса, признаки которого усматриваются в современной физике. Я полагаю, что было бы правильнее говорить о несколько своеобразных и вряд ли обоснованных уклонах в современной физической мысли.

2. Времена великих физиков-натурфилософов —-времена Галилея, Декарта, Ньютона, Фарадея, Максвелла, Гельмгольца, Кельвина — уже прошли, но тем не менее каждый современный физик должен Стремиться быть хоть до некоторой степени натурфилософом. Без определенного философского подхода к исследованию природы фи-

зических явлений трудно избегнуть односторонности и, в отдельных по крайней мере случаях, ошибочности наших физических представлений. И вместе с тем, говоря о физике в мировом масштабе, нельзя не признать, что современная физическая мысль, устремляясь в большинстве случаев *в* область частных, подчас узких, групп явлений, в общем не очень культивирует проведение строго обоснованных с философской точки зрения исходных положений. В этом отношении весьма характерными представляются соображения, высказанные проф. Эренфестом, который занимает в Лейденском университете кафедру Лоренца и является одним из высокоавторитетных европейских представителей современной физики. Вот, что он сказал в 1930 г. (цитирую по опубликованной) стенограмме одного из его выступлений):... хороший физик философствует очень редко и только, если ему уже не остается ничего другого, и, если не ошибаюсь, он это делает всегда чрезвычайно плохо. И вот этого то я и боюсь, прямо как огня...". К сожалению, приходится согласиться с проф. Эренфестом в том, что хороший физик в настоящее время действительно философствует очень редко и очень боится это делать, а если уже ему приходится так или иначе прибегнуть к философии, то он использует ее, быть может, недостаточно хорошо. Не подлежит сомнению, что дело обстоит именно так. Но из этого отнюдь не следует, что физик должен, вообще говоря, бояться философствовать. Соприкасаясь с вопросами физики, мы обязаны, я полагаю, хоть в какой-либо степени философствовать. Что же делать, если мы будем выполнять это не совсем хорошо! Лучше так, чем никак! Начав „философствовать чрезвычайно плохо", мы мало-по-малу научимся делать это лучше. Но без какого бы то ни было философского обследования частных и общих проблем физики можно уподобиться тому, кто строит здание, не имея надежного фундамента.

3. В настоящем докладе я поставил своею целью рассмотрение основных воззрений современной физики с точки зрения некоторых условий их возникновения, а также с точки зрения их вероятного соответствия реальному содержанию изучаемых явлений. В связи со сказанным, необходимо прежде всего отметить, что физические представления, долженствующие отображать в нашем сознании, во-первых, объективные реальности, принимающие участие в физических процессах, и, во-вторых, соотношения этих реальностей, создавались в условиях определенной исторической обстановки и, до известной степени, вытекали из методов, которыми пользовались исследователи, анализировавшие физические явления. В этом отношении особенно сильное влияние оказали приемы и методы математики. Понятия и образы, возникавшие на математической почве и являвшиеся весьма полезными и ценными в процессе анализа, нередко трактовались затем в виде каких-то реальностей или в виде неотъемлемых свойств, присущих данным реальностям по самой природе вещей. Таким образом, в физическое мышление

проникли представления, которые можно назвать *объективированными математическими абстракциями*. И все это иногда допускалось без достаточного обследования новых представлений применительно к выяснению их физического значения и к их сообразованию с тем, что может происходить в действительности. Упускалось из вида, в отдельных случаях, и то исключительно важное обстоятельство, что изучение некоторой физической проблемы может допускать использование весьма разнообразных методов математического анализа, каждый из которых требует введения своих особых вспомогательных понятий.

В связи со всем вышеизложенным мы до последнего времени встречаемся с физическими воззрениями, в отношении которых не имеется объективных оснований для того, чтобы их можно было признать адэкватными реальному содержанию тех или иных физических явлений.

4. Итак) следует чрезвычайно строго различать символы и вспомогательные понятия, которыми мы пользуемся в процессе математического анализа физических явлений, с одной стороны, и реальное содержание этих явлений, с другой стороны. Конечно, необходимо принять во внимание, что весьма трудно на практике провести указанное разграничение, так как мы познаем природу только через посредство наших ощущений путем эксперимента, лишь в некоторых случаях имеющего дело непосредственно с ближайшими проявлениями чего-то, реально существующего и нами обследуемого. Обычно же в большинстве случаев современный утонченный и сложный физический эксперимент предоставляет нам возможность судить только о каких-либо отдаленных проявлениях предполагаемой объективной реальности, и притом нередко свое окончательное заключение мы обосновываем на математическом анализе результатов опыта с известной лишь долей вероятности, используя иногда статистические методы. Все это совершенно справедливо, но тем не менее исследователь, изучающий физические явления, на какой бы принципиальной позиции он ни стоял, располагает, как физик, единственной возможностью: *последовательно и без всяких отступлений проводить то положение, что предмет его изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания и что в действительности происходит не то или иное в зависимости от нашей точки зрения, а нечто совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно неподчиненное нашим точкам зрения*. Несмотря на все трудности, сопряженные с разделением мира на „субъект" и „объект", одна из основных задач физики заключается именно в проведении возможно более четкой границы между этими двумя областями познания.

5. Проблема пространства и времени издавна занимала умы всех натурфилософов. Последние десятилетия ознаменовались возобновлением углубленной критики наших представлений, относящихся к этой области, и ряд новых идей непосредственно коснулся физики. Эйнштейн в связи с разработкой общей теории относительности пришел к заключению, что пространственно-временная непрерыв-

ность, в которой совершаются физические явления, не есть эвклидова непрерывность и что из этого вытекает ряд следствий, имеющих существенное значение и выражающихся в ощутимых на опыте уклонениях от установленных ранее физических закономерностей, по крайней мере в условиях космических масштабов. Но, во всяком случае, идея о той или иной пространственно-временной характеристике процессов природы составляет основной фон всякого физического мышления. Вне времени и трехмерного пространства мы не можем себе представить каких-либо физических явлений. Но я позволяю себе утверждать более того. Каковы бы ни были ваши представления о пространстве, в котором протекают во времени различные физические процессы, будет ли это пространство Эвклида, или пространство Лобачевского, или пространство Эйнштейна, или же, наконец, любое иное пространство, хотя бы подчиненное закону квантования, совершенно независимо от всего этого сколь угодно малым объективно существующим элементам, участвующим в каком-либо физическом процессе, мы обязательно должны приписывать некоторые соответствующие им, не равные нулю, объемы нашего трехмерного пространства.

В дальнейшем, ради краткости, я буду называть *физическою реальностью* всякую объективную реальность, участвующую в каком-либо физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении. Таким образом, я утверждаю, что *всякая физическая реальность в целом или сколь угодно малая ее часть обязательно занимает некоторый объем нашего трехмерного пространства.*

Настоящее утверждение, по существу, вытекает из всего опытного и теоретического материала, накопленного в области физики.

Еще Декарт положил в основание своих рассуждений представление о принципиальной объемной протяженности физических тел и физической субстанции вообще. Он выдвинул положение о немыслимости пространства, не заполненного вечно движущейся материей. До последнего времени физика не рассматривала каких-либо иных физических реальностей. Физика не имеет дела с такими реальностями, о которых можно было бы предположить, что они существуют в некотором пространстве, в число измерений которого не входили бы все три измерения нашего физического пространства. Трудно допустить, чтобы таковое особенное пространство вообще реально существовало. Вполне признавая большую ценность и целесообразность использования идеи о пространствах высших измерений в математических операциях, например, современной квантовой теории волн, признавая полную закономерность этих операций с математическими символами, мы должны строго различать подобные символы от могущих иметь к ним отношение физических реальностей, которые мы обязательно ассоциируем с некоторым конечным объемом трехмерного физического пространства.

Выдвигаемая мною на первый план *объемная характеристика* физической реальности, как я указал, по существу более или менее явно принимается во всех физических рассуждениях и построениях,

но только без достаточной четкости и без надлежащего признания» совершенной категоричности тех директив, которые отсюда вытекают. Может показаться, что я, выступая с требованием обязательности объемной характеристики, стучусь в открытую дверь. К сожалению, дело обстоит не так, и на этой почве наблюдаются некоторые нежелательные уклонения как в нашем научном языке, так и в нашем физическом мышлении.

6. Наши физические представления изобилуют образами, являющимися объективированными математическими абстракциями и символами, которые без должных оснований стоят в нашем мышлении рядом с физическими реальностями и весьма часто рассматриваются как нечто эквивалентное физическим реальностям или их подлинным взаимоотношениям.

Остановимся для начала на нескольких простейших примерах. Такие чисто геометрические понятия, как точка, линия, поверхность л объем, как таковой, не могут быть относимы к категории физических реальностей, несмотря на их безусловную полезность и даже абсолютную необходимость при общем и математическом рассмотрении физических процессов. Некоторый вполне определенный объем

нашего трехмерного пространства, ничем не заполненный, представляет собою пример чистой абстракции, не имеющей никакого физического содержания. То же необходимо признать и в отношении геометрической поверхности, линии и точки, каждая из которых сверх того не обладает никаким объемом и, следовательно, не удовлетворяет требованиям объемной характеристики физической реальности.

Материальная точка, являющаяся объектом изучения в области теоретической механики, есть не что иное, как математическая абстракция, совершенно необходимая при анализе законов движения, но ни в коем случае не могущая быть рассматриваемой в качестве некоторого реального объекта физического эксперимента, так как объем, занимаемый материальною точкою, равен нулю. Все это, повидимому, элементарно ясно, а между тем приходится встречаться с противоположными утверждениями и с мнением, что реальное физическое тело можно вообразить состоящим из совокупности определенного количества материальных точек, надлежащим образом распределенных в некотором объеме и, конечно, находящихся в каком-то движении.

Вследствие глубоко вкоренившейся всеобщей привычки к объективированию математических абстракций я несомненно встречу немало возражений против утверждения, что центр тяжести некоторого тела во всяком случае не есть такая реальность, с которою мы можем непосредственно иметь дело в каком-либо физическом эксперименте. Мне скажут, что ведь можем же мы непосредственно как бы осязать центр тяжести тела, можем подвесить тело за его центр тяжести и наблюдать таким образом равновесное состояние тела. На все возражения такого рода я, чтобы не отвлекаться подробным рассмотрением этого специального случая, отвечу весьма кратко: попробуйте подвесить кольцо за его центр тяжести!

В качестве следующего примера объективирования представлений, возникших на почве математического анализа физических явлений, я назову всякого рода векторы. Мы привыкли оперировать с векторами механической силы, силы тяготения, электрических и магнитных сил и т. д., рассматривая их как некоторые физические реальности. Математические теории различных силовых полей составляют один из наиболее замечательных и разработанных отделов современной физики. А между тем все эти векторы являются не чем другим, как только известными математическими абстракциями, облегчающими нам описание и исследование взаимоотношений между несколькими физическими реальностями. Равнодействующая двух векторов есть такая же абстракция, как и исходные векторы или как любые составляющие, на которые данный вектор может быть разложен. Для выяснения этого вопроса представим себе, например, тяжелый шар, подвешенный на длинной тонкой нити в открытом пространстве при наличии горизонтального ветра. Мы знаем, что в этом случае нить подвеса отклонится от вертикали. С целью решения задачи об угле отклонения и в предположении, что давлением ветра на самую нить и ее весом можно пренебречь, а также можно пренебречь и расстоянием точки закрепления нити на поверхности шара от его центра тяжести, мы должны сложить по правилу параллелограма вертикальный вектор силы тяжести, равный весу данного шара, и горизонтальный вектор силы давления ветра на его поверхность. Равнодействующая этих двух сил своим направлением и определит угол отклонения нити подвеса от вертикали. Спрашивается: существует ли равнодействующая двух рассмотренных сил объективно, т. е. вне нашего сознания? Конечно нет. Ведь если бы она существовала объективно, то, следовательно, она действовала бы на шар одновременно с весом шара и давлением ветра на его поверхность, каковые две силы мы во всяком случае с большим правом могли бы считать объективно существующими, чем их равнодействующую. Таким образом получилось бы, что к шару одновременно приложены три силы и натяжение нити подвеса оказалось бы вдвое больше, чем это есть в действительности. Следовательно, равнодействующая сила существует только в нашем воображении. Все происходит не так, как если бы она существовала объективно, т. е. вне нашего сознания. Но ведь и вертикальный вектор силы тяжести есть в свою очередь равнодействующая большого количества элементарных сил

тяжести, приложенных к отдельным материальным частицам шара. Аналогично и горизонтальная сила давления ветра есть лишь равнодействующая элементарных сил, проистекающих от удара отдельных частиц воздуха о поверхность шара. Наконец, и упомянутые элементарные силы, к которым можно свести все равнодействующие, являются лишь представлениями, символизирующими в нашем сознании тенденции к движению отдельных частей шара, возникающие под влиянием некоторых отчасти известных, отчасти же мало изученных физических процессов.

Ближайшее рассмотрение всех других видов векторов сил, а также вообще других групп векторов (скорости, ускорения, век-

тор Пойнтинга и т. д.) позволяет вскрыть их происхождение как математических абстракций и в то же время, конечно, выяснить, с какими именно проявлениями тех или иных физических процессов их необходимо ассоциировать. Если же, говоря о природе явлений, мы попытаемся вложить в представление о векторе некоторое содержание, выходящее из рамок чисто математической абстракции, обычно весьма необходимой, то мы несомненно пойдем по ложному пути, который может привести нас и в отдельных случаях приводит к отнесению к категории физических реальностей или их физических же соотношений того, что является лишь *вспомогательным понятием*, вполне законным в процессе математического анализа, но не при рассмотрении сущности явлений.

Итак, на почве объективирования математических абстракций и символов мы иногда вводим в круг наших физических представлений *воображаемые образы* или *фикции*. Оперирование с подобными фикциями нередко имеет следствием возникновение ошибочных воззрений, относящихся к природе того или иного физического явления.

7. Я подробнее остановлюсь на особенно ярком и оставившем наиболее глубокий след в развитии физической науки случае объективирования математических абстракций. Я имею в виду actio in distans, т. е. действие на расстоянии. Представления, вытекающие из этой точки зрения, доминируют в настоящее время и составляют, вообще говоря, неизменный основной фон физической мысли.

Известно, что идея о действии на расстоянии, рассматриваемом в качестве первичного физического явления, возникла в связи с работами Ньютона, который дал математическую формулировку открытого им закона всемирного тяготения. Сам Ньютон совершенно неповинен в приписываемом ему некоторыми учеными введении в науку идеи о *„физическом" действии на расстоянии*. Он ясно понимал, что область применения представлений, казалось бы, диктуемых законом всемирного тяготения, ограничивается рамками математического анализа проявлений тяготения и ни в коем случае не должна быть распространяема на вопросы, касающиеся самой сущности тяготения. Великий математик, показавший весьма совершенные образцы надлежащего использования формулированного им закона к тем положивший основание всей небесной механике, Ньютон, будучи одновременно и великим физиком, вполне отчетливо и достаточно категорически высказал свое мнение о природе тяготения. По этому поводу он писал (в третьем письме к Бентли): „Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим непрерывно согласно известным законам".

В развитии математической теории электрических и магнитных явлений роль закона Ньютона сыграли аналогичные, всем известные законы Кулона, относящиеся к электрическим и магнитным взаимодействиям. На почве законов Кулона и их применений создались представления, которые

мало-по-малу начали внедряться в наше физическое мышление, вообще говоря, без достаточных оснований. Возникло представление о магнитных массах, которые стали трактоваться как некоторые физические реальности. Взаимодействия же этих масс, а также электрических зарядов на расстоянии начали рассматриваться в качестве первичных свойств, присущих им по самой природе вещей. Что касается электрических зарядов, то еще до работ Кулона они получили всеобщее признание в качестве физических реальностей. В какой мере Кулон может считаться причастным к введению в область физики новых представлений, которые совершенно не соответствуют действительности, явствует из следующего. В одном из своих мемуаров, посвященных магнитизму, он говорит: „Из этих экспериментов следует, что, какова бы ни была причина магнитных явлений, все эти явления могли бы быть истолкованы и подвергнуты анализу при посредстве допущения, что в стальных пластинках или в их молекулах находятся две магнитных жидкости, причем частицы каждой такой жидкости взаимно отталкиваются пропорционально их плотности и обратно пропорционально квадрату их расстояния и притягивают частицы другой жидкости в том же отношении..."

Фиктивность магнитных масс вскрылась благодаря исследованиям Фарадея, и это признается в современной физике, хотя иногда и высказываются противоположные суждения.

Работы Максвелла поколебали было обычное представление об электрических зарядах как о чем-то, не зависящем от процессов, происходящих в окружающем пространстве, но развитие электронной теории отодвинуло на задний план идеи Максвелла, и до последних лет не было, казалось, сомнения в том, что электрический заряд, как таковой, есть нечто, самостоятельно существующее.

В самое последнее время, однако, в связи с развитием волновой механики наши представления об элементарном электрическом заряде, т. е. об электроне, приобрели новый характер. Электрон перестает мыслиться в виде обособленной физической реальности, занимающей строго определенный объем. В наших современных представлениях электрон некоторым образом расплывается в окружающем пространстве, теряет свои резкие границы. Сохраняя все же признаки физического индивидуума, электрон как бы обобщается с соответствующим физическим процессом, происходящим вокруг него, и является только своего рода специфическим гребнем на фоне интерферирующих волн, что на языке квантовой теории волн называется волновым пакетом. Таким образом, намечается сближение с основными воззрениями Максвелла с учетом, конечно, того богатого материала, которым располагает современная физика в связи

с развитием мысли о квантовании в области электромагнитных процессов.

Что же касается самой идеи действия на расстоянии, то необходимо со всею определенностью констатировать необычайную стойкость этой *псевдофизической* идеи. До самых последних дней современная физика в лице многих своих представителей трактует действие на расстоянии как нечто, вполне отвечающее природе вещей, как первичное физическое явление. И это наблюдается несмотря на глубоко философское содержание всех трудов Фарадея, Максвелла, Герца. Объяснение нужно искать в чрезмерном влиянии на наше физическое мышление методов математического анализа. Широкое и плодотворное использование высшего анализа при изучении физических явлений, необычайная утонченность и, я бы сказал, изящество многих методов этого анализа естественно приводят к тому, что ученые, работающие в области физики и, вообще говоря, весьма совершенно владеющие всем аппаратом высшего анализа, до известной степени непроизвольно объективируют формы и образы, являющиеся чистыми математическими абстракциями. Форма выдвигается на первый план, заслоняя собою содержание. В этом отношении мы имеем дело с чем-то аналогичным наблюдаемому в литературе и в изобразительных искусствах, где время от времени возникают течения, ставящие форму выше содержания.

Как всем хорошо известно, точке зрения действия на расстоянии противопоставляется фарадее-максвелловская точка зрения, утверждающая, что все взаимодействия в природе осуществляются не иначе, как через посредство физических процессов, которые происходят в пространстве, окружающем взаимодействующие физические центры. Так как пространство не может быть

физически мыслимо без заполняющей его какой-то среды, то, следовательно, фарадее-максвелловская точка зрения считается с участием среды во всех физических взаимодействиях. Возникновение этой точки зрения становится вполне понятным с психологической стороны, если вспомнить, что гениальный Фарадей не обладал математическим образованием и своих идей никогда не выражал в математической форме. Его физическое мышление, таким образом, было совершенно свободно от какого бы то ни было влияния или гипнотизирующего воздействия со стороны математической символики. Фарадей оперировал непосредственно с конкретными физическими образами и представлениями, подвергая их всесторонней критике в процессе экспериментального обследования. Вместе с тем он не боялся философствовать и уделял большое внимание общему рассмотрению природы вещей и их соотношений. В частности, он высказал много глубоких по своему содержанию соображений по поводу роли среды, в противовес точке зрения действия на расстоянии, и при этом имел обыкновение ссылаться на авторитет Ньютона, напоминая цитированные выше слова из его переписки с Бентли. Нельзя не признать, что отмеченное выше устремление Фарадея в сторону содержания, а не формы, явилось одним из очень серьезных моментов, содействовавших развитию в нем способности дать

нам высокие, никем непревзойденные образцы подлинно физической мысли.

Максвелл, полностью разделявший с Фарадеем его основные воззрения и явившийся их интерпретатором, используя для этой цели язык математики, принял, если можно так выразиться, специальные меры к тому, чтобы в его мышлении форма не заслонила содержания. В предисловии к своему „Трактату об электричестве

и магнитизме" Максвелл касается вопроса об особенном характере этого труда, отличающем его от других трудов того же рода, опубликованных, главным образом, в Германии, и приводит по данному поводу следующее разъяснение: „Одна из причин этого состоит в том, что, прежде чем я начал изучать электричество, я принял решение не читать никаких математических сочинений, посвященных настоящему вопросу, до прочтения фарадеевских „Опытных исследований по электричеству" от начала до конца".

Можно выразить сожаление, что пример Максвелла находит мало подражателе ', а между тем это был бы один из лучших путей развития в нашем подрастающем поколении молодых физиков наклонности к физическому мышлению, возможно более свободному от влияния математических абстракций.

8. Современная физическая мысль, как было не раз отмечено выше, может быть охарактеризована отрицательным отношением к непременному участию среды во всякого рода физических взаимодействиях. Я позволю себе разобрать два примера, которые особенно наглядно иллюстрируют на конкретных случаях принципиальные расхождения точки зрения действия на расстоянии и противоположной точки зрения. Представим себе два электрических заряда q_1 и q_2, расположенные на определенном расстоянии один от другого (рис. 1).

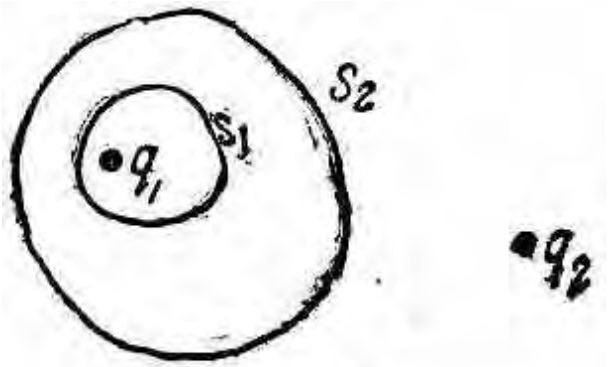


Рис. 1.

Допустим, что некоторые две замкнутые поверхности S_1 и S_2 окружают со всех сторон заряд q_1, нигде не касаясь одна другой и не пересекаясь. Спрашивается:

Могут ли заряды q_1 и q_2 взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом в слое, ограниченном поверхностями S_1 и S_2, не происходило какого бы то ни *было* физического процесса?

С точки зрения действия на расстоянии на этот вопрос необходимо ответить „да".

С точки зрения Ньютона, Фарадея и Максвелла единственным правильным ответом будет самое категорическое „нет".

Ответ „да", казалось бы, заключает в себе нарушение основных геометрических свойств физического трехмерного пространства. Объяснить действие на расстоянии можно было бы только путем допущения обязательной связи физических реальностей, в данном случае зарядов q_1 и q_2, с какими-то процессами, происходящими

где-то за пределами нашего трехмерного пространства. Но такого рода объяснения мы не называем физическими, и рассмотрение их лежит вне темы настоящего доклада.

Ответ "нет" представляется совершенно естественным с физической точки зрения и по существу вытекает из закона причинности и объемной характеристики всякой физической реальности. Строго говоря, ответ „нет" можно было бы обосновывать одной только обязательностью этой объемной характеристики, так как самый закон причинности в том виде, как мы его понимаем при изучении физических явлений, теряет всякий смысл, если мы допустим существование физической реальности, не занимающей в нашем трехмерном пространстве никакого объема, т. е. являющейся одновременно физическим „ничто".

Цитированные выше слова профессора Эренфеста были сказаны именно по поводу вопроса, подобного тому, который мы теперь разбираем. Он кроме того выражал мнение, что спор между фарадее-максвелловским взглядом и точкой зрения действия на расстоянии должен быть разрешен при помощи какого-либо специального experimentum crucis. Мне же представляется, что этот спор может и должен быть разрешен путем простого логического рассмотрения простейших случаев. Какой бы experimentum crucis мы ни поставили, результаты его всегда можно пытаться трактовать математически н с той и с другой точки зрения. Подтверждение сказанному можно найти в истории вопроса о распространении электромагнитных возмущений.

В качестве второго примера рассмотрим случай беспроволочной передачи электромагнитной энергии от некоторой радиостанции *A* (рис. 2), сигналы которой получаются приемной станцией *B*.

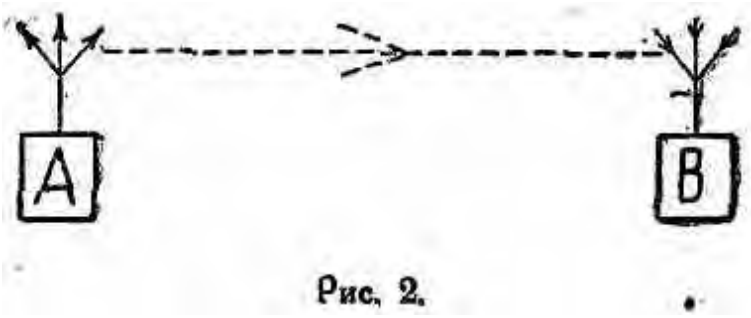


Рис. 2.

Предположим, что расстояние между этими станциями очень велико и равно, например, десяти световым годам. В то время, когда станция *A* посылает свои радиосигналы, приемная станция *B*, допустим, еще не существует. После того, как станция А послала свою радиотелеграмму в окружающее пространство, мы можем ее совершенно разрушить, так что она больше не существует. Затем, по прошествии девяти лет приступим к сооружению приемной станции *B* и закончим ее до истечения десяти лет. Ясно, что ровно через десять лет с момента посылки радиосигналов станцией *A* мы примем эти сигналы станцией *B*.

Как необходимо понимать рассматриваемое явление с точки зрения Фарадея и Максвелла и с точки зрения действия на расстоянии, на почве которой стоит современная электронная теория?

Фарадее-максвелловская точка зрения учит нас, что электромагнитная энергия, излученная радиостанцией *A* и являющаяся энергией какого-то специфического сложного движения среды, вместе

с этим движением распространяется при ближайшем участии среды в более и более удаленных районах, и, в конце концов, некоторая доля первоначально излученной энергии достигнет приемной станции *B*, возбудив в ее антенне электрические колебания, усиливаемые далее надлежащим образом и воспринимаемые в качестве сигналов, посланных станцией *A*.

Точка зрения действия на расстоянии, сильно поколебленная в своих позициях открытиями Герца, выходит из затруднений при объяснении рассматриваемого явления введением в физическую науку представления о так называемом запаздывающем действии на расстоянии. Таким образом, с этой точки зрения электроны, колеблющиеся вперед и назад вдоль антенны отправительной радиостанции *A*, действием на расстоянии приводят в соответствующее колебание электроны в приемной антенне станции *B*, но только это действие на расстоянии запаздывает ровно на десять лет.

Внешне все как будто обстоит совершенно благополучно, и не может возникнуть никаких возражений с чисто формальной стороны. Однако, дело принимает совсем иной оборот, если мы попытаемся задать вопрос: а где в течение десяти лет пребывала излученная радиостанцией Л электромагнитная энергия? Ответ с фарадее-максвелловской точки зрения не нуждается в пояснениях. Позиция же современной электронной теории приводит к ряду безысходных противоречий. Действительно, если среда не принимает никакого участия в процессе передачи электромагнитной энергии от станции *A* до станции *B*, то необходимо утверждать, следовательно, что эта энергия, как таковая, вообще нигде не существует в течение десяти лет, другими словами, совершенно исчезает из нашего трехмерного пространства. Но в таком случае, по какой причине некоторая незначительная доля ее внезапно рождается в антенне станции *B* ровно через десять лет? Где даются директивы, во исполнение которых энергия вдруг появляется в физическом трехмерном пространстве в точно указанный момент? Здесь мы имеем дело с несомненным нарушением закона сохранения энергии и закона причинности.

Необходимо отметить, что в современной квантовой теории волн приходится встречаться с указаниями на необходимость отказа от закона причинности в применении к явлениям, протекающим в микрокосмических условиях. Разобранный пример показывает, что уклонения от фарадее-

максвелловской точки зрения приводят нас к отказу не только от закона причинности, но и от закона сохранения энергии даже в масштабах макрокосмоса.
С точки зрения действия на расстоянии необходимо считать в высокой степени непоследовательным, что электронная теория, чтобы как-либо избавиться от явных противоречий в отношении излученной электромагнитной энергии, в конце концов вынуждена прибегнуть к указанному Максвеллом объемному интегрированию, дающему количество энергии электромагнитного поля и имеющему физический смысл только с фарадее-максвелловской точки зрения, от которой современная электронная теория четко отмежевывается. В таком же затруднительном положении эта теория оказывается

и в ряде других случаев, между прочим, при решении вопроса о самом простом и самом важном случае проводимости, именно при рассмотрении сверхпроводимости, которая принципиально не может быть описываема на языке электронной теории, пока последняя будет игнорировать участие среды.
После всего изложенного выше можно в полной мере оценить глубокое значение слов О. Д. Хвольсона, который в своем „Курсе Физики" говорит: „Термином actio in distans, т. е. действие на расстоянии, обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие....
9. В последнее время приходится иногда встречать указания, что физик должен синтезировать такие две противоположности, как точку зрения действия на расстоянии и фарадее-максвелловскую точку зрения. Не отрицая большого значения синтеза противоположностей как мощного средства, которым мы должны пользоваться в научной работе, я все же полагаю, что, прежде чем обращаться к синтезу, необходимо предварительно подвергнуть тщательному анализу самые противоположности с точки зрения их совместимости в данной области и соответствия природе вещей. Может оказаться, что некоторые две противоположности совершенно непримиримы. Например, вряд ли можно синтезировать в области тригонометрии два противоположных утверждения: $\cos\varphi<1$ и $\cos\varphi>1$. Но может случиться, что данные противоположности, не примиримые в одной области, могут быть синтезированы в другой. Это именно и имеет место в отношении точек зрения действия на расстоянии и фарадее-максвелловской. Они вполне примиримы, и их можно синтезировать в качестве методов математического анализа явлений природы. Как известно, Максвелл дал их математический синтез в своем " Трактате об электричестве и магнитизме" и показал, что обе точки зрения в ряде случаев математически совершенно эквиваленты и приводят к одним и тем же результатам, хотя практически они и не во всех случаях одинаково удобны. Путем простых математических преобразований легко можно перейти от символов, определяемых одной точкой зрения, к символам, соответствующим другой. Но совершенно иначе обстоит дело, если мы будем пытаться синтезировать эти точки зрения в области физического мышления в связи с вопросом о природе явлений. В этом случае они совершенно непримиримы и взаимно исключают одна другую. Одна, повидимому, соответствует природе вещей, а другая представляет собою математическую абстракцию, не имеющую физического смысла. Ведь в действительности имеет место некоторое совершенно определенное первичное физическое явление, которое не может быть либо тем, либо другим (в зависимости от нашей точки зрения), либо одновременно и тем и другим. Как можно синтезировать ответы „да" и „нет" на вопрос, относящийся к рис. 1? Мыслимо ли построить такую физическую теорию, чтобы можно было утверждать, что в слое между поверхностями S_1 и S_2 в одно

и то же время и происходит какой-то физический процесс и решительно ничего не происходит? Направляя нашу мысль на развитие обоснований такого утверждения, мы делали бы нечто подобное

тому, как если бы мы, например, в области математики, стремились доказать одновременную справедливость двух положений: 2X2=5 и 2X2≠5. Что либо одно: либо „да", либо „нет", в зависимости, так сказать, от „точки зрения". Никакой синтез противоположностей в рассматриваемом случае неприменим. Допуская противное, мы вступаем на очень опасный путь, чреватый весьма печальными последствиями.

10. Перейдем теперь к рассмотрению одного из самых важных представлений, с которыми оперирует современная физика. Речь идет об идее квантования во всех физических процессах, вообще, и в области электромагнитных процессов, в частности. При этом термин „квантование" я понимаю в самом широком смысле. Трудно подыскать достаточно яркие слова для того, чтобы с необходимою отчетливостью выявить громадное значение этого основного воззрения, которое должно признать поистине величайшим достижением современней физики, дающим нам ключ к углубленному пониманию явлений природы.

Сущность общего представления о квантовании заключается в признания того, что во всех наблюдаемых нами явлениях природы мы встречаемся с некоторыми элементарными реальностями, каждая из которых может быть рассматриваема в известном смысле как нечто самостоятельное целое. Так, мы имеем дело с молекулами и атомами материальных тел, с электронами и протонами, входящими в состав материального атома, с определенными порциями лучистой энергии, применительно к которым и был впервые введен термин „квант". В волновой механике своего рода квантом является волновой пакет. С представлением о квантовании мы встречаемся в современной физике повсюду, в особенности при изучении микрофизических явлений, к каковой области относятся и вопросы, касающиеся строения атома. Вне этого представления современная физическая мысль совершенно не может работать и развиваться.

Как известно, истоки идеи о квантовании надо искать в глубокой древности в форме представления об атомах, из которых состоят все тела. Основные черты атомистического учения имеются в некоторых системах древнейшей индийской философии. У философов древней Греции — у Левкиппа, Демокрита, Эпикура — атом играет существенную роль в их представлениях о природе. Римский поэт и философ Лукреций пропагандирует атомистическое учение. В позднейшие времена идея об атоме, между прочим, весьма своеобразно отразившаяся в натурфилософских построениях Декарта, мало-по-малу начинает приобретать все больше и больше сторонников, и в конце концов теперь, после ряда великих открытий в области физики и химии, мы уже перестали говорить об атоме, как о некоторой гипотезе. Несомненно, современной физике мы обязаны последними, самыми трудными этапами на этом долгом и, подчас, извилистом пути.

Представление об элементарном количестве электричества преемственно связано с атомистическим учением в области материи. Уже Фарадей, открывший законы электролиза, совершенно отчетливо понял, что эти законы требуют для своего объяснения, с одной стороны, признания интимной связи между материей и электричеством и, с другой стороны, существования некоторого минимального количества электричества, которое должно быть ассоциировано с зарядом самого легкого, т. е. водородного, иона и кратные которого являются зарядами всех без исключения других ионов. В связи с этим Фарадей определенно говорит об „абсолютном количестве электричества" именно в том смысле, в каком мы теперь говорим о зарядах электрона и протона, и даже объясняет, по каким мотивам он избегает применять в отношении элементарного количества электричества термин „атом". После Фарадея те же законы электролиза дают повод Веберу, Максвеллу, Гельмгольцу и другим ученым высказывать свои соображения по вопросу об атомной структуре электричества, и, таким образом, идея об элементарном количестве электричества в значительной степени созрела к моменту, когда ряд открытий из различных областей — проводимость газов, явление Зеемана, радиоактивность — позволил современной физике выполнить важнейшую, заключительную часть

работы и создать представление об электроне, безусловно отвечающее определенной физической реальности.
С именем Планка мы связываем введение в круг физики представления о квантах лучистой энергии. Можно, конечно, усматривать преемственную связь между современной корпускулярной теорией излучения и ньютоновой теорией истечения, зерно истины в которой на долгие годы было заслонено классической волновой теорией света. Величайшая заслуга современной физики состоит в том, что она выявила это зерно истины и взрастила его, облекши в формы квантовой теории, которая, непрерывно развиваясь, привела к квантовой теории волн и, можно надеяться, закончит намечающийся уже теперь синтез корпускулярных и волновых представлений, обычно рассматриваемых в качестве некоторых противоположностей. Современная квантовая теория волн, по существу, подготавливает почву для этого синтеза не только в отношении электромагнитного излучения, но и в связи с нашими представлениями об элементах материального атома, каковыми являются электроны и протоны. Трудным местом в физическом освоении некоторых представлений этой теории является пока то обстоятельство, что она лишь в простейших случаях оперирует с волновыми процессами, интерпретируемыми как некоторые волны в пределах нашего трехмерного пространства, в общем же случае ее математические операции относятся к пространствам высших измерений. Но, конечно, квантовая теория волн является еще очень молодым, хотя и многообещающим, детищем современной физики, и можно далеко итти в своих ожиданиях в связи с несомненным ее дальнейшим развитием.
25

Наконец, идея о квантовании сыграла очень большую роль в разработке современного учения о строении атома. Квантовым условиям подчиняются орбиты, по которым движутся электроны, входящие в состав атома. Надо полагать, что это должно будет найти себе объяснение в свойстве самих электронов претерпевать какие-то специфические изменения в пределах некоторых квантовых условий. Это тем более вероятно, что электрон теперь мыслится в качестве, недостаточно хотя еще изученного, сложного комплекса электромагнитного характера. Физически понять квантование орбит внутриатомных электронов иначе невозможно, так как орбиты, сами по себе, являются чисто геометрическими представлениями, при помощи которых мы лишь описываем поведение физических реальностей, образующих в совокупности атом. Но выяснение физического смысла принципиально необходимых постулатов Бора есть дело будущего.
В ряде отделов квантовой теории остается еще, само собою разумеется, очень много весьма ответственной работы, однако, во всяком случае то, что уже сделано, представляет собою одну из блестящих страниц в истории физики вообще.
Так как, по существу, электромагнитная концепция физических явлений все более и более укрепляется, так как квантовая теория в конце концов всегда имеет дело с каким-то электромагнитным комплексом той или иной сложности, то будет уместно отметить истории вопроса о квантах, что первые указания на квантование в области процессов электромагнитного характера можно и, по моему мнению, необходимо усмотреть не только в соображениях Фарадея по поводу законов электролиза, но и в его идеях о физически существующих элементах магнитного потока. Хотя физическая наука нашего времени в большинстве случаев не оперирует с этим представлением Фарадея, играющим столь важную роль в практическом использовании магнитного потока, однако, общий ход развития этой науки позволяет думать, что она к нему так или иначе вернется, подобно тому, что мы можем уже констатировать в отношении ньютоновой корпускулярной теории света, т. е. теории истечения.
11. Математический аппарат квантовой волновой теории изобилует применением абстракций, многие из которых вряд ли могут претендовать на то, чтобы получить какое-либо физическое содержание. Не говоря уже о том, что некоторые математические абстракции этой теории явно выходят за пределы нашего трехмерного пространства, возбуждает тревогу определенная тенденция к отрицанию грани между объектом и субъектом. Это замечание в особенности касается так

называемого соотношения неопределенности, которое может служить наиболее современным примером объективирования представлений, возникающих на почве математического анализа данных физического опыта. Не подлежит ни малейшему сомнению, что делается большой шаг вперед благодаря установлению пределов точности опытного определения отдельных положений электрона или какого-либо иного кванта, с которым мы встречаемся

в области микрофизики. Весьма важно знать пределы, которых нельзя перейти по соображениям принципиального характера и наличие которых вносит известную неопределенность в наши суждения *о* результатах опыта. Все это завершает многолетнюю работу в области анализа и критики данных физического опыта и в указанном смысле является очень значительным достижением. Но, по моему мнению, необходимо отнестись весьма отрицательно к склонности современной физической мысли объективировать соотношение неопределенности, играющее сравнительно большую роль в микрофизических, явлениях. Почему, например, выдвигается положение, согласно которому понятие „траектория движущегося электрона" должно терять свой смысл для области малых квантовых чисел? Из того, что на опыте в этом случае мы можем определить, допустим, одну единственную точку и то лишь с известной долей вероятности, отнюдь не вытекает отсутствие какого бы то ни было движения электрона в физическом трехмерном пространстве, если только представление об электроне соответствует некоторой физической реальности. Ведь, если нам удастся определить только одно положение какой-либо впервые открытой малой планеты, и затем она по той или иной причине сделается недоступной для наблюдения, мы никак не можем лишить себя права рассуждать о вероятной траектории движения этой планеты или, в случае распадения ее на части, о вероятных траекториях движения отдельных ее частей.

Можно было бы, конечно, говорить о том, что в области малых квантовых чисел или в каких-либо других условиях электрон лишь внезапно возникает в известном месте, а до этого момента и после него электрон, как таковой, вовсе не существует. Быть может, это иногда имеет место, в особенности, например, после момента наблюдения, когда мы воздействуем на электрон со стороны наблюдающей системы. Однако, в таком случае периоду небытия электрона, как такового, должен соответствовать некоторый процесс (волнового, допустим, характера), и данный процесс должен иметь место не в области какого-то особого пространства высших измерений, вне пределов физического трехмерного пространства, а обязательно должен протекать именно в этом трехмерном пространстве, будучи надлежащим образом координирован относительно места последнего наблюдения электрона. Мы опять же будем иметь право говорить о траектории распространяющегося в пространстве процесса, понимая все это в более общем смысле.

Отказываясь от какого бы то ни было прямого или распространительного представления о траектории электрона, объективируя соотношение неопределенности в этом и в ряде других случаев, а также, конечно, обязательно принимая все вытекающие отсюда последствия, физик рискует выйти весьма далеко за пределы физики и, в первую очередь, приходит к конфликту с законом причинности, о чем было упомянуто выше.

12. Представление о квантовании в самом широком его понимании заключает в себе идею о *пространственной прерывности*

всех вообще физических процессов. И вместе с тем, оставаясь в области физической мысли и стремясь по возможности освободиться от чисто математических абстракций, мы должны совершенно отбросить какое бы то ни было оперирование с пространством, абсолютно пустым, в полном смысле этого слова. Следовательно, прерывность физических процессов мы не можем мыслить в связи с абсолютно пустыми промежутками между отдельными элементами — квантами, на которые мы расчленяем физическое содержание того, что происходит в природе. Подобные абсолютно

пустые промежутки физически недопустимы. О них можно говорить только в пределах математического анализа. Таким образом, прерывности физически мыслимы только на фоне физической же *непрерывности.*

Мы никак не можем ограничиться констатированием сосуществования прерывности и непрерывности, приняв его просто как основное положение, не требующее дальнейшего развития. Физическая мысль не может на этом успокоиться, а, наоборот, она должна стремиться и действительно стихийно стремится к синтезу этих противоположностей, каждая из которых несомненно выражает собою нечто объективно реальное. Должно признать, что на пути решения рассматриваемого, по существу, очень старого вопроса встречается много затруднений, кажущихся почти непреодолимыми. Но как раз именно развитие квантовой теории волн, которым современная физика может по справедливости гордиться, явно ведет к тому, чтобы был, наконец, выполнен физический синтез прерывности и непрерывности.

Собственно говоря, для простейшего случая, когда можно говорить о пакете максвелловских волн, математический аппарат этой теории с формальной стороны уже выявил искомый синтез. Остается только задать вопрос: что именно колеблется в связи с волновым процессом? При этом, конечно, мы должны отрешиться от представления о простом колебательном движении, составлявшем предмет изучения в области классической волновой теории света, а иметь в виду колебательный характер какого-то специфического состояния той физической реальности, которой свойственно приобретать это состояние и которую мы на обычном нашем физическом же языке не умеем называть иначе, как некоторой средой. Помимо указанного пути трудно представить себе какой-либо иной метод физической трактовки понятий, вытекающих из квантовой теории волн. Необходимо подчеркнуть, что математик имеет полное основание не интересоваться тем, что именно колеблется, но для физика вопрос этот имеет принципиальное значение. *Абсолютно пустое пространство, лишенное всякого физического содержания, не может служить ареной для распространения каких бы то ни было волн.*

Развивая мысли в намеченном направлении и стремясь использовать представление о волнах в трехмерном пространстве также в отношении самого общего случая, чего мы пока не умеем осуществить путем операций с уравнением Шредингера, мы можем

надеяться притти в конце концов к полному физическому синтезу указанных выше противоположностей—прерывности и непрерывности. При этом все прерывности представятся в форме каких-то, более или менее ярко выраженных пучностей в процессе, который происходит на фоне физической непрерывности, заполняющей все трехмерное пространство, т. е. на фоне некоторой среды.

13. Мы подошли, наконец, к самому существенному вопросу, когда-либо занимавшему физическую мысль, — к вопросу о физической среде, без которой наше трехмерное пространство являлось бы только какой-то чисто математической абстракцией.

Современная физика, склонная усматривать в действии на расстоянии первичное физическое явление, относится отрицательно к этому вопросу. Представление о среде, заполняющей все пространство и непосредственно участвующей во всех физических процессах в качестве передатчика всякого рода взаимодействий, рассматривается теперь как некоторые, так сказать, леса, которые необходимы были при возведении здания современной физической теории. Когда сооружение здания закончено, леса могут быть разобраны и отброшены прочь, как нечто ненужное и уже окончательно сыгравшее свою подсобную роль. Все это совершенно верно с точки зрения формально-математического понимания того, чем должна быть физическая теория. В этом отношении не может быть никаких возражений. *Но дело представляется совсем в другом виде, если под физической - теорией разуметь строго обоснованную и не содержащую внутренних противоречий систему взаимно согласованных физических представлений.* В этом случае роли меняются. Методы и язык

математического анализа необходимо рассматривать только в качестве лесов, облегчающих возведение здания физической теории путем выявления количественных соотношений и характеристик физических реальностей. С развиваемой мною точки зрения, леса, облегчавшие построение физической теории, по окончании этой работы мы разбираем, но не отбрасываем прочь, и в дальнейшем пользуемся материалом этих бывших лесов, т. е. приемами математического анализа, при некоторых частичных надстройках, могущих потребоваться в связи *с* новыми открытиями, а также при всякого рода описании и практическом использовании физической теории. Таким образом, с точки зрения природы вещей *математические построения и формулировки не составляют сущности физической теории, а играют в ней лишь подсобную, хотя и весьма важную роль.*

По целому ряду причин, о которых я уже достаточно говорил, построение физической теории, охватывающей весь материал, накопленный наукою, немыслимо без признания особенного значения среды, заполняющей все трехмерное пространство. На языке прошлых эпох, пережитых физикою, эта универсальная среда называется *эфиром*. За неимением другого, быть может, более подходящего термина мы будем продолжать пользоваться словом „эфир" в смысле какой-то основной среды, непрерывно заполняющей пространство, хотя современная физика весьма тщательно

избегает представления об эфире, как бы совершенно в нем не нуждаясь.

Специальная и общая теории относительности отвергают эфир, и вместе с тем, однако, Эйнштейн признает, что геометрические свойства пространства не самостоятельны, а обусловлены материей. Казалось бы, что это утверждение Эйнштейна влечет за собою отрицание физического смысла в представлении о каком-либо объеме пространства, абсолютно свободном от материи. Тем не менее, из хода рассуждений общей теории относительности следует, что здесь речь идет лишь о гравитационной материи, а не о материи в более общей смысле некоторой физической среды, непрерывно заполняющей пространство. Такая универсальная среда не требуется согласно теории относительности, которая допускает существование областей трехмерного пространства, абсолютно ничем не заполненных. Все это, конечно, указывает на *абстрактно-математический характер* этой теории.

Теория относительности оперирует с полем тяготения. Современная теория электромагнитных явлений основана на развитии учения о полях электрических и магнитных. Но математическая теория силового поля, по существу, теснейшим образом связана с идеей действия на расстоянии, простого или запаздывающего. Поэтому современное представление о каком-либо силовом поле является такой же математической абстракцией, как и действие на расстоянии, и точно так же обычно объективируется без достаточных оснований. Вложить физическое содержание в учение о силовых полях можно, только вернувшись к основным фарадее-максвелловским воззрениям, касающимся обязательного участия некоторой среды во всех взаимодействиях, и тогда современное учение о силовом поле необходимо будет рассматривать в качестве весьма ценной математической характеристики физического силового поля. Итак, признание какой-то универсальной среды, скажем эфира, безусловно необходимо для развития физической мысли, которая в противном случае приходит к ряду существенных противоречий.

В настоящее время мы не располагаем достаточными материалами для построения физической теории эфира. В этом отношении наибольшие затруднения возникают при рассмотрении вопроса о непрерывности эфира, который необходимо трактовать в качестве какой-то основной среды, являющейся первичной физической реальностью и не оставляющей абсолютно незаполненными сколь угодно малые объемные участки нашего трехмерного пространства. Быть может, однако, мы никогда не будем в состоянии „понять" непрерывности эфира по чисто принципиальным причинам. Дело в том, что обычное „понимание" чего бы то ни было всегда так или иначе сопряжено с подчинением содержания данного объекта более обшей категории объектов. Так, например, понимание того, что представляет собою материальное тело, сводится к идее об атомах и об атомной

структуре. Атомы мы понимаем как определенные комплексы электронов и протонов, а последние мы теперь стремимся понять, хотя бы, как некоторые волновые пакеты. Мысля

о предельной физической субстанции, об эфире, мы не можем, повидимому, итти по этому проторенному пути, так как мы не можем себе представить существования сверхпредельной физической субстанции, некоторого над-эфира. Эфир, по моему мнению, является в отношении его непрерывности своего рода *„непознаваемым"*. В этом, вероятно, кроется основная причина затруднений в построении физической теории эфира, и я полагаю, ,что если это будет, наконец, когда-либо выполнено, то лишь на базе *постулата о непрерывности эфира*. Данный постулат несомненно должен быть внутренне связан с положением о физической немыслимости, о фиктивности абсолютно пустого пространства.

14. Из всего предыдущего вытекает, что создание физической теории, охватывающей самый широкий круг явлений, затруднительно и, вероятно, совершенно невозможно на почве отрицания первенствующего значения среды и на основе объективирования действия, на расстоянии в качестве первичного физического явления. До настоящего времени общей физической теории еще не существует в законченном виде. Но можно с полным правом высказать уверенность, что в будущем физическая мысль возвратится к принципиальным воззрениям Фарадея и Максвелла, разовьет их путем учета всех новейших достижений и завершит построение общей физической теории. Действительно, уже намечается определенный, еще недостаточно осознанный, сдвиг в этом направлении. В подтверждение сказанного достаточно напомнить хотя бы только о квантовой теории волн, о метаморфозе ваших представлений об электроне и о диффракции материальных лучей. Но во всяком случае фарадее-максвелловская точка зрения по вопросу о непременном участии среды во всех физических процессах представляется единственной мыслимой путеводной нитью для дальнейшего успешного развития современной физики, так много сделавшей и так. много обещающей сделать.

[1]) Faraday. Experimental Researches in Electricity, §§ 852, 869, 870.

[1]) О. Д. Хвольсон. Курс Физики, том 1, стр. 181, 1923.

[1])Coulomb Collections de Mem relatifs a la Physique, 3, p. 321.

[1]) Электричество, 1930, № 8, стр. 349.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Акад. В. Ф. МИТКЕВИЧ
ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗЗРЕНИЯ
СБОРНИК ДОКЛАДОВ И СТАТЕЙ
ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ДОПОЛНЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Государственная
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
Н. К. Т.
632|4 53
М·664
40

МОСКВА 1939 ЛЕНИНГРАД

ПРОВЕРКА
VIII ГНБ 1949
СВЕРДНС

Редактор изд-ва З. Н. Перля.
Технический редактор А. П. Дронов Корректор Л. М. Шиловцева
Сдано в набор 3/IX 1939 г. Подписано к печати 10/XII 1939 г. Формат 60×92¼₁₆. Бум. л. 6¾
Объем 12¾ п. л. и 1 вкл. В 1 п. л. 46 000 печ. зн. Уч.-авт. л. 14,46. Тираж 3000 экз.
Уполн. Главлита А-19397 РИСО № 1105 АНИ № 1405. Заказ № 3792.
Цена 5 руб. 50 коп., переплет 3 руб.
1-я Образцовая типография Огиза РСФСР треста „Полиграфкнига". Москва, Валовая, 28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I.

Стр.
Предисловие..... 3
I. Работы Фарадея в области электромагнитной индукции в связи с его общими физическими воззрениями..... *7*
II. Основные воззрения современной физики..... 16
III. О «физическом» действии на расстоянии..... 38
IV. О некоторых основных положениях, относящихся к области физики 49
V. О механистической точке зрения в области основных физических представлений..... 53
VI. О современной борьбе материализма с идеализмом в области физики 61
VII. Значение книги Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» в современной борьбе с идеализмом в области физики 94

Часть II.

VIII. Выдержки из стенограммы дискуссии о природе электрического тока (происходившей в 1929 и 1930 гг. в Ленинградском политехническом институте).....105
IX. Выдержки из статьи «К вопросу о природе электрического тока» …….119
X. Об ответах М. Л. Ширвиндта и Ю. П. Шеина по поводу десяти вопросов .135
XI. К вопросу об условности математической трактовки физических явлений.....142
XII. По поводу статьи проф. Д. Б. Гогоберидзе «К вопросу об условности математической трактовки физических явлений» . . ……. 148
XIII. По поводу физических воззрений проф. Д. Б. Гогоберидзе . . …….. 154
XIV. К окончанию дискуссии с проф. Д. Б. Гогоберидзе об основных физических воззрениях 156
XV. О позиции И. Е. Тамма в отношении принципиальных воззрений Фарадея и Максвелла ..161
XVI. Фарадей «против» фарадеевской точки зрения .....…….... 165
XVII За фарадее-максвелловскую установку в вопросе о природе физических взаимодействий....168
XVIII. Выдержка из дискуссии по докладу «О физическом действии на расстоянии»...176
XIX. Выдержки из дискуссии на мартовской сессии Академии Наук СССР в 1936 г....178
XX. По поводу статьи акад. А. Ф. Иоффе «О положении на философском фронте советской физики»…….……..187

МИХАИЛ ФАРАДЕЙ 1791-1867

ПРЕДИСЛОВИЕ к 3-му изданию

Книга «Основные физические воззрения» представляет собою сборник ряда моих докладов, статей и выступлений (начиная с 1930 по 1938 г.), в которых в той или иной степени затронуты вопросы нашего миропонимания. Касаясь почти исключительно области физики, основной науки о природе, я стремился, возможно, более четко и определенно проводить воззрения, вытекающие из общих установок диалектического материализма.

По сравнению со 2-м изданием этого сборника, вышедшим в 1936 г., 3-е издание дополнено тремя статьями. В Основной части сборника (часть I) добавлены две статьи, опубликованные в журнале «Под знаменем марксизма» в 1938 г., а именно «О современной борьбе материализма с идеализмом: в области физики» и «Значение книги Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» в современной борьбе с (идеализмом в области физики». В части II этого сборника, содержащей некоторые другие мои статьи, а также отдельные выдержки из моих статей и из стенограмм выступлений во время различных дискуссий, имевших отношение к затронутым в сборнике темам, — добавлена опубликованная в журнале «Под знаменем марксизма» в 1937 г. моя статья «По поводу статьи акад. А. Ф. Иоффе — «О положении на философском фронте советской физики».

Материалы, собранные в части II, являются некоторым развитием части I и, кроме того, они в значительной степени освещают современное положение вопроса о пересмотре наших основных физических воззрений, не всегда безупречных с материалистической точки зрения. Нередко мы оперируем представлениями, которые не имеют непосредственного отношения к подлинной природе физических явлений, но в ряде случаев оказываются лишь результатом ничем не оправдываемого объективирования математических абстракций. Последнее обстоятельство представляет собою одну из причин идеалистических уклонов в области физического мышления, которое в настоящее время иногда подменяется формально-математическими операциями, не контролируемыми строгим анализом с точки зрения наших принципиальных научно-философских установок.

В своей длительной борьбе против подобных ошибочных уклонов я уделил значительное внимание вопросу об объективной реальности электромагнитного поля, вообще, и магнитного потока, в частности.

В связи с этим, стремясь отвлечься от всяких обстоятельств, до известной степени имеющих характер второстепенных подробностей, я подверг критическому рассмотрению современные основные представления о природе физических взаимодействий. Я полагаю, что в построении пока еще не существующей в законченном виде общей физической теории, которая являлась бы строго обоснованной и не содержащей внутренних противоречий системой взаимно-согласованных физических представлений, возможно полнее отражающих действительные соотношения в природе, — весьма ответственную роль должны играть наши принципиальные установки в отношении того, как именно объективно-реально осуществляются физические взаимодействия, без обязательного наличия которых не мыслимо никакое физическое явление. Совершенно несомненно, что эти взаимодействия составляют один из главных моментов во всех без исключения физических явлениях. Таким образом, мне пришлось коснуться противопоставления точки зрения действия на расстоянии и основной фарадее-максвелловской точки зрения, согласно которой всякого рода электромагнитные взаимодействия возможны не иначе, как при непременном участии материальной среды в пространстве, окружающем взаимодействующие центры или системы. Являясь решительным сторонником второй точки зрения, я вместе с тем полагаю, что старый спор между двумя указанными точками зрения должен быть разрешен не путем постановки каких бы то ни было специальных экспериментов, так как этого сделать нельзя, но только путем надлежащего анализа наших общих научно-философских установок в отношении их возможно большего соответствия всей совокупности имеющихся опытных данных о явлениях природы.

Идя по указанному пути и отстаивая объективную реальность электромагнитного поля и магнитного потока, в частности, я счел весьма целесообразным сформулировать вопрос,[1] который касается именно основных условий всякого физического взаимодействия и так построен, что допускает

только один строго определенный ответ — «да» или «нет», при исключенном третьем. Вместе с тем я доказал, что формулировка моего вопроса вполне законна и правильна.

Я утверждаю, что указанный вопрос может и должен занять центральное место в борьбе против идеалистических уклонов в физическом мышлении и имеет исключительно важное значение, так как решение данного вопроса категорически требует от отвечающего вполне четких установок в отношении его основных представлений о внешнем мире вообще.

Мой вопрос в действительности включает в себе ряд других принципиальных вопросов, касающихся самых главных моментов в нашем мировоззрении. Ответ на сформулированный мною вопрос, ответ «да» или «нет», в полной мере зависит от того, как именно мы относимся к объективной реальности вещей и предметов внешнего мира,

[1] См. настоящий сборник, статьи II, III, VIII, XI, XII, XV, XVI, XVII и XX.

как мы смотрим на физическое пространство, как мы относимся к принципу причинности и закону сохранения энергии и т. д. и т. п. Все это более подробно разъяснено в конце статьи VI настоящего сборника, которая посвящена рассмотрению основных установок материалистического миропонимания. Сформулированный мною вопрос в скрытом виде касается всех этих принципиальных установок и по существу эквивалентен вопросу об их признании или об их отрицании.

Таким образом, четкий и недвусмысленный ответ на мой вопрос — четко и недвусмысленно выявляет основы нашего физического мышления (материалистические или идеалистические).

В этом и заключается смысл моего вопроса, этим именно и определяется его значение в борьбе за материалистическое миропонимание. Заостряя внимание на существенном конкретном моменте из области физических явлений, этот принципиальный вопрос дает возможность решительно отклонять всякие общие и многословные рассуждения, сводящиеся, как показывает опыт, к затушевыванию антагонизма материалистического и идеалистического воззрений на природу.

Некоторые из возражающих против проводимых мною физических 'представлений неоднократно упрекали меня по поводу якобы механистичности этих представлений. Ввиду того, что делавшие мне подобного рода упреки допускали ошибочное понимание сущности •механицизма в физике и основывались нередко на формально-филологических признаках, я специально разобрал этот вопрос в статье «О механистической точке зрения в области основных физических представлений» (статья V настоящего сборника), а также коснулся данного вопроса и в ряде других своих статей (статья VI, например). Это было тем более необходимо, что указанные ошибки допускались не только со стороны тех моих критиков, которые придерживаются идеалистических позиций, но даже со стороны критиков, казалось бы, обязанных разбираться в вопросе о том, что такое механицизм. К сожалению, до сих пор возникает немало недоразумений на почве ошибочного отождествления терминов «механический» и «механистический».

Возражали мне также и по поводу самого метода вопросов, который я часто применял в научно-философской дискуссии. Неоднократно делались попытки всячески дискредитировать метод вопросов, обращаемых к противной стороне. По этому поводу напомню только следующее. В 1908 г. во время борьбы с махистами Ленин сформулировал 10 вопросов [1] для того, чтобы вскрыть ошибочные установки идейных противников, уклонявшихся от недвусмысленного выявления своих принципиальных установок подобно тому, как это случается и в настоящее время.

Мне, как автору этой книги, доставляют удовлетворение многочисленные отклики моих читателей, свидетельствующие о большом

[1] Ленин. Соч., 2-е изд., 1935 г., т. XIII, стр. 3—5.

интересе широких масс советской учащейся молодежи, физиков и техников к научно-философским вопросам. Ряд дискуссий, возникших, начиная с 1929 г. в связи с поднятыми мною вопросами,

приобрел в некоторых случаях чрезмерно острый и напряженный характер, подчас выходящий из рамок простого высказывания своих мнений. В этом отношении необходимо, однако, со всей категоричностью отметить, что лично я, по существу бывший инициатором ряда дискуссий, никогда не делал первых шагов к нежелательному обострению той или иной дискуссии. Мне приходилось только отражать некоторые весьма резкие нападки со стороны моих идейных противников. В огромном большинстве случаев они не проявляли той уравновешенности и того спокойствия, которые столь полезны при ведении научно-философской дискуссии.

Я должен благодарить А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилова, В. А. Фока, Я. И. Френкеля, И. Е. Тамма и других примыкающих к ним физиков за то, что своими высказываниями они несомненно помогли мне особенно отчетливо понять сущность наших принципиальных расхождений и в значительной степени уточнить формулировки тех основных положений, которые я защищаю. Я полагаю, что пройдет немного времени и мои идейные противники осознают свои расхождения с основными установками материалистического миропонимания, после чего их дальнейшая деятельность станет еще более плодотворной и мы все, лучше понимая друг друга, чем это было до сих пор, будем упорно работать на пользу советской физической науки. Во всяком случае, дискуссии, предметом которых являются общие представления о природе, должны способствовать развитию подлинно физического мышления у всех, стремящихся к этому и даже бывших сначала более или менее индиферентными в этом отношении.

В настоящем 3-м издании сборника внесены кое-какие мелкие исправления редакционного характера.

В некоторых случаях я в настоящее время выразился бы более определенно, характеризуя ряд противоречий, обнаруживающихся в области основных физических представлений. Однако, я счел необходимым сохранить старый текст, добавив лишь несколько примечаний, особо помеченных. В ряде моих статей и выступлений встречаются простые повторения того, что было уже сказано раньше. Я сделал это совершенно сознательно, так как иногда мне было затруднительно найти другие подходящие слова и обороты речи, чтобы возможно более отчетливо еще раз обратить внимание на то или иное весьма существенное, с моей точки зрения, обстоятельство.

В заключение считаю долгом выразить признательность З. Н. Перля за весьма существенную помощь, оказанную мне при оформлении этой книги.

В. МИТКЕВИЧ

Февраль 1939

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

I

РАБОТЫ ФАРАДЕЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В СВЯЗИ С ЕГО ОБЩИМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ВОЗЗРЕНИЯМИ [1]

1. Сто лет тому назад, в 1831 г., Фарадей открыл явление электромагнитной индукции тока. Открытие это ознаменовало собой новую эру в истории науки об электричестве и магнетизме и вместе с тем оно дало в руки человечества мощное средство для практического использования естественных энергетических ресурсов. Вся современная электротехника выросла на базе великого фарадеевского открытии, сущность которого заключается в следующем. Во всех без исключения случаях, когда мы имеем изменения в относительном расположении некоторого проводящего контура и магнитного поля, перпендикулярного контуру в целом или отдельным его частям, находящимся в поле, — в контуре возникают особые электродвижущие силы, так называемые индуктированные электродвижущие силы. Если алгебраическая сумма этих электродвижущих сил, т.-е. полная электродвижущая сила, индуктируемая в контуре, не равна нулю и контур замкнут, в нем возникает индуктированный электрический ток. Во всех современных динамо-электрических генераторах, во всех трансформаторах переменного тока и в огромном количестве других электротехнических устройств используется это явление электромагнитной индукции тока.

2. Обращаясь к истории фарадеевского открытия, необходимо, прежде всего, отметить, что в период времени, непосредственно предшествовавший 1831 г., был сделан ряд открытий и научных работ, свидетельствовавших о необходимости нового подхода к явлениям электрическим и магнитным. Дело в том, что до того времени эти две группы физических явлений рассматривались как совершенно обособленные и не связанные одна с другой. В 1820 г. Эрстед открыл первое звено, связывающее электричество и магнетизм, показав, что электрический ток, который протекает по проводнику, присоединенному к полюсам вольтова столба, оказывает механическое дей-

[1] Речь, произнесенная 22 ноября 1931 г. в Академии Наук СССР на Торжественном заседании, посвященном столетию открытия электромагнитной индукции.

ствие на расположенную вблизи магнитную стрелку и стремится повернуть, ее так, чтобы она установилась перпендикулярно проводнику. Таким образом Эрстед обнаружил магнитное поле тока. В том же 1820 г. Араго при помощи электрического тока намагнитил кусок стали и Ампер представил в Парижскую академию наук доклад о своих опытах над механическим действием токов на токи и магнитов на токи. В 1821 г. Фарадей открыл, что проводник, по которому течет электрический ток, стремится вращаться вокруг полюса магнита. В 1823 г. Ампер дал свою теорию электродинамики и электромагнетизма. В 1824 г. Араго наблюдал успокаивающее действие медной пластины на качающуюся над ней магнитную стрелку. Баббэдж и Гершель, тщательно изучая это таинственное явление и разнообразя обстановку опыта, добились обращенного эффекта. Именно, в 1825 г. они показали, что медный диск, вращающийся вокруг вертикальной оси, может увлечь в это вращение магнитную стрелку, так расположенную над медным диском, чтобы острие, на котором она покоится, находилось на оси диска, причем между стрелкой и вращающимся диском располагалась параллельная ему стеклянная пластина, исключавшая непосредственное действие на стрелку со стороны воздушных вихрей. В том же 1825 г. Стэрджен построил свой первый электромагнит.

С момента опубликования открытия Эрстеда весь ученый мир с лихорадочным возбуждением занялся исследованиями в области новых электромагнитных явлений. Нередко бывали случаи поспешных выступлений с описанием ошибочных наблюдений. Так, например, в заседании Парижской академии наук 6 ноября 1820 г. Френель в своем докладе заявил, что ему удалось

разложить воду посредством магнита, неподвижно лежащего внутри проволочной спирали. Присутствовавший в том же заседании Ампер указал, что он также наблюдал нечто в роде возбуждения электрического тока помощью магнита. Через полтора месяца оба автора отказались от своих утверждений, признав их несоответствующими результатам тщательно поставленных проверочных опытов. В следующие годы Ампер неоднократно возвращался к этой теме, но, по свидетельству Беккереля, он в 1825 г. пришел к убеждению о невозможности получить электрический ток при помощи магнита.

В такой чрезвычайно напряженной атмосфере работала и научная мысль Фарадея. Он с большой настойчивостью искал новых явлений, характеризующих связь между электричеством и магнетизмом. Убежденный в единстве сил природы вообще, он не мог удовлетвориться допущением односторонней связи между физическими явлениями. Эта связь казалась ему не вполне установленной, пока какое-либо наблюденное физическое явление не могло быть обращено, пока не был открыт обратный эффект. Так и в случае электрического тока и магнитного поля. Движение электричества сопровождается магнитным полем. Должно существовать и обратное явление! В чем же оно состоит? В лабораторном дневнике Фарадея за 1822 г. есть запись: «Обратить магнетизм в электричество!». Чтобы разрешить постав-

8

ленную перед собою задачу, ему пришлось проделать огромное количество опытов. С небольшими перерывами он, занимавший уже с 1825 г. пост директора лаборатории Королевского института, все возвращался к этой теме. Много раз он терпел неудачу и с огорчением отмечал в своем дневнике: «Безрезультатно». Наконец, 29 августа 1831 г. Фарадею удалось в первый раз произвести опыт, в котором с несомненностью выявилось то, чего он так долго искал. В течение всего десяти рабочих дней в промежуток времени с 29 августа по 4 ноября этого года Фарадей не только открыл все основные явления из области электромагнитной индукции тока, но и полностью осветил их новыми физическими представлениями.

3. Первый, исторический опыт Фарадея был произведен с железным кольцом, на которое были нанесены две независимые обмотки из медной проволоки (по нынешней терминологии — первичная и вторичная). Вот как описывает Фарадей этот опыт в своем лабораторном дневнике:

«Я изготовил железное кольцо (из мягкого железа); железо взято круглое, в $^{7}/_{8}$ дюйма толщиною, и кольцо имело внешний диаметр в 6 дюймов. Вокруг железного сердечника было намотано много витков медной проволоки, причем половина обмотки отделена при помощи шнурка и коленкора. Было намотано (с одной стороны) три куска проволоки, каждый около 24 футов длиною, и они могли быть соединены в одну общую обмотку или употребляться раздельно. Изоляция отдельных частей этой обмотки была установлена путем проверки при помощи батареи. Будем называть эту сторону кольца *A*. На другой стороне, но с интервалами от первой обмотки, было намотано два куска проволоки общею длиною около 60 футов... Будем называть эту сторону *B*.

«Была заряжена батарея из десяти пар пластин по 4 кв. дюйма. Витки на стороне *B* составляли одну обмотку и концы ее были соединены медной проволокой, отходящей в сторону на некоторое расстояние и как раз над магнитной стрелкой, находившейся в 3 футах от кольца. Затем концы одной из обмоток на стороне *A* присоединялись к батарее: немедленно — заметное действие на стрелку. Она колебалась и, наконец, пришла в начальное положение. При прерывании соединения обмотки *A* с батареей — снова бросок стрелки».

На другой же день после этого опыта, 30 августа 1831 г., Фарадей уже совершенно отчетливо осознал связь открытого им явления с таинственными результатами экспериментов Араго над влияниями медного диска на магнитную стрелку.

В своих последующих опытах Фарадей наблюдал появление кратковременного индуктированного тока в катушке из медной проволоки при наличии внутри нее прямолинейного железного стержня, который намагничивался или размагничивался путем поднесения к нему постоянных магнитов или удаления их. Затем был проделан опыт, аналогичный первому опыту с железным кольцом, но при этом применялись катушки из медной проволоки без всякого железного

9
сердечника. Далее, постоянный полосовой магнит быстро вводился внутрь катушки, присоединенной к гальванометру, или выводился из нее. Были обнаружены кратковременные отбросы стрелки гальванометра то в одну, то в другую сторону и при этом было обращено особое внимание на необходимость наличия относительного движения проводника и магнитного поля. С совершенной очевидностью была установлена причина неудачи во время многочисленных предыдущих опытов, когда это обстоятельство не было учтено. В девятый день своих опытов с вновь открытым явлением Фарадей привел во вращение медный диск, расположенный между полюсами сильного подковообразного магнита, соединив с гальванометром ось и край диска при посредстве металлических щеток. При этом стрелка гальванометра длительно отклонялась. Фарадей возбуждал таким образом постоянный ток, используя явление электромагнитной индукции. Наконец, в десятый день Фарадей индуктировал ток простым движением проводника поперек магнитного поля подковообразного магнита, и в описании этого эксперимента уже говорит о пересечении магнитных линий проводником. Итак, вся фактическая сторона явления электромагнитной индукции была установлена с исчерпывающей полнотой и была выяснена качественная сторона общего закона электромагнитной индукции. Несколько позже Фарадей формулировал и количественные законы, которым подчиняется это явление.

4. Открытие Фарадея, значительно расширившее область соотношений между электрическими и магнитными явлениями, дало мощный импульс развитию науки. Ученые всего мира занялись дальнейшим изучением электромагнитного поля на основе того, что было открыто Фарадеем. Клерк Максвелл, гениальный продолжатель дела Фарадея, полностью воспринял его основные физические представления и облек в математическую форму многое из его идей. Как известно, сам Фарадей не владел математическим анализом и не пользовался им в своей научной работе. В полном соответствии с общим ходом мыслей Фарадея, Максвелл обобщил закон электромагнитной индукции, распространив его на случай какого угодно контура, независимо от того, проводящий он или непроводящий. По существу, половина максвелловых уравнений электромагнитного поля представляет собою не что иное, как именно дифференциальную форму обобщенного закона электромагнитной индукции. Как известно, Максвелл своими дифференциальными уравнениями положил начало математической теории электромагнитного поля и учению об электромагнитных волнах. Вместе с тем он установил электромагнитную, природу света. Герц, продолжая работу Максвелла, на опыте воспроизвел электромагнитные волны сравнительно большой длины и показал, что они действительно обладают теми же свойствами, что и световые колебания. Вся современная радиотехника возбудилась к жизни после опытных исследований Герца.

Необычайная плодотворность научных достижений Фарадея теснейшим образом связана с его своеобразным подходом к пониманию физических явлений, с выработанными им простыми и отчетливыми

10
физическими представлениями. Это сказалось и в области практических применений открытого им явления электромагнитной индукции. Трудно, совершенно невозможно, напр., представить себе расчет различных электромагнитных механизмов, не основанный на применении фарадеевского метода для физического толкования этого явления. 5. Как известно, основным фоном научного мышления Фарадея было твердое убеждение в том, что все взаимодействия в природе вообще, и все электрические и магнитные взаимодействия в частности, совершаются не иначе, как при непременном участии промежуточной среды. Родившийся в рабочей семье,[1] не располагавший вследствие этого материальными средствами, которые позволили бы ему получить систематическое образование, с 13 лет начавший свою трудовую жизнь в качестве подмастерья переплетной мастерской,— Фарадей всеми своими научными знаниями был обязан исключительно себе. Он сам выработал свои физические воззрения, все свободное время посвящая самообразованию и с жадностью читая самые разнообразные научные книги, с которыми он сталкивался, между прочим, благодаря своему ремеслу переплетчика. Быть может, этой именно обстановкой, в которой вырос

Фарадей, в значительной степени и объясняется его свобода от всякого рода предрассудков, которые царили и продолжают царить в официальной науке. Гипертрофированная математическая тренировка нередко приводит нас к тому, что реальный физический мир мы мыслим как пространство, в котором некоторым образом распределены различные математические символы, как то: материальные точки, векторы сил, функции Ψ и т. п. При таком формально-математическом подходе к физическим явлениям, становится совершенно естественным и в некотором смысле вполне правильным представление о действии одного физического центра на другой на расстоянии. Безусловно несомненно, что математическое описание физических явлений нередко чрезвычайно упрощается с точки зрения actio in distans и в целом ряде случаев «все происходит так, как будто бы» физические центры взаимодействуют на расстоянии через «ничто». Но совсем иначе приходится рассуждать, когда мы стремимся углубиться в вопроса о природе взаимодействий, в вопрос о том, как именно эти взаимодействия осуществляются. Подобный вопрос может, конечно, совершенно не интересовать математика, посвятившего себя решению задач из области физики. Но великий физик 'Фарадей, в своих работах вскрывавший природу физических взаимоотношений, не мог удовлетвориться допущением взаимодействия через «ничто», как какого-то первичного физического явления, и всегда чувствовал определенную антипатию по отношению к точке зрения actio in distans. Мысль о физической несостоятельности этой точки зрения все более и более овладевала умом Фарадея. Он любил ссылаться на мнение Ньютона по этому поводу, совершенно четко выраженное в нижеследующих словах (третье письмо Ньютона к Бентлею):

---

[1] Фарадей родился 22 сентября 1791 г. в семье лондонского кузнеца

11

«Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим постоянно согласно известным законам...».[1]

Здесь уместно будет указать, что О. Д. Хвольсон в томе I своего «Курса физики» говорит:

«Термином «actio in distans», т.-е. «действие на расстоянии», обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие...».

В предисловии к своему «Трактату об электричестве и магнетизме» Максвелл касается вопроса об особенном характере его труда, отличающем его от других трудов этого рода, опубликованных главным образом в Германии, и приводит по этому поводу следующие разъяснения:

«Одна из причин этого состоит в том, что прежде чем я начал изучать электричество, я принял решение не читать никаких математических сочинений, посвященных данному вопросу, до прочтения фарадеевских «Опытных исследований по электричеству» от начала до конца. Я был осведомлен; что высказывалось мнение о различии между фарадеевским методом понимания явлений и методами математиков, так что ни Фарадей, ни математики не были удовлетворены языком друг друга. Я имел также твердую уверенность в том, что это разногласие не является результатом ошибок той или другой стороны. Я получил такую уверенность прежде всего благодаря сэру Вильяму Томсону, советам и помощи, а также опубликованным трудам которого я очень многим обязан из того, что я изучил по этому вопросу.

«Когда я стал углубляться в изучение Фарадея, я заметил, что его метод понимания явлений также оказывается математическим, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я на-

---

[1] По поводу этой цитаты, приводимой и в других статьях настоящего сборника, С. И. Вавилов («Под знаменем марксизма» № 7 за 1937 г. стр. 59) упрекает меня в неосведомленности относительно

окончания цитаты, в которой якобы отражаются религиозные ' воззрения Ньютона. Можно, однако, спорить о том, в какой мере Ньютон в своих заключительных словах к данному отрывку отдал дань религиозным предрассудкам своей эпохи. Именно, для того, чтобы не было поводов уклоняться в сторону от существа дела и не тратить времени на бесполезные в данном случае споры, я и опустил эти заключительные слова Ньютона, цитируя его в своих докладах в Академии Наук. Напомню, что цитата приведена полностью во всех трех изданиях моего курса «Физических основ электротехники» (1928 г., 1932 г. и 1933 г.). (Примечание, добавленное в 1939 г.)

В. М.

12

шел также, что этот метод может быть выражен в обычной математической форме и, таким образом, может быть сопоставлен с методами признанных математиков.

«Например, Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, проходящие по всему пространству, там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел промежуточную среду там, где они ничего не видели, кроме расстояния. Фарадей искал сущность явлений в том, что в действительности происходит в среде; другие удовлетворялись тем, что находили эту сущность в способности действия на расстоянии, которою одарены электрические жидкости.

«Когда я перевел то, что я рассматривал как фарадеевские идеи, в математическую форму, я нашел, что в общем результаты обоих методов совпадают, так что одни и те же явления учитываются обоими этими методами, и они приводят к одним и тем же законам действия...

«Я нашел также, что некоторые из наиболее плодотворных методов исследования, открытых математиками, могут быть много лучше выражены в терминах, вытекающих из идей Фарадея, чем в их оригинальной форме».

В связи со всем вышеизложенным становится совершенно очевидным, что формально-математический метод оперирует с внешним эффектом, обнаруживаемым в явлении, в фарадеевском же методе главным объектом внимания служит внутренняя обстановка, при наличии которой и благодаря которой возникает рассматриваемое явление. Ясно поэтому, что метод Фарадея должен приводить исследователя к более тесному контакту с тем, что в действительности происходит в природе.

6. Итак, Фарадей не мыслил никакого физического явления вне участия той среды, которая окружает действующие в этом явлении физические центры. Соображениями этого рода он руководствовался и в своих исследованиях в области электромагнитной индукции. На этой почве возникло и представление Фарадея о «физических силовых линиях» магнитного поля как о реально существующих нитеобразных элементах магнитного потока, называемых нами теперь просто магнитными линиями. Физическое содержание закона электромагнитной индукции, данное Фарадеем, заключается именно в том, что основной причиной возникновения индуктированного электрического тока является пересечение проводника магнитными линиями. Фарадея мы должны считать основателем учения о магнитном потоке, о его физических свойствах. Он установил принцип непрерывности магнитного потока, гласящий, что каждая магнитная линия, его составляющая, всегда образует принципиально замкнутый контур, который никогда не может претерпевать какого-либо разрыва. Фарадей установил, что магнитные линии обладают свойствами упругих нитей, в системе которых проявляются механические силы в форме продольных тяжений и бокового распора.

Мысль об особо важном, доминирующем значении магнитного

13

потока во всех электромагнитных явлениях принадлежит Фарадею. Работы последнего периода его научной деятельности, за время которого он подверг тщательному анализу все основные известные факты, касающиеся области магнитного поля, почти полностью посвящены обоснованию и развитию этой мысли. Все сказанное целиком относится и к тому электромагнитному комплексу, который мы называем электрическим током, протекающим по некоторому проводнику. В магнитном потоке, окружающем проводник с током и сцепляющемся с ним, Фарадей был склонен видеть нечто

большее, чем просто явление, сопутствующее электрическому току. В высокой степени характерно, что Фарадей, открывший законы электролиза и тем самым, казалось бы, давший убедительное доказательство тому, что представление о движении электричества внутри проводника, несущего ток, имеет непосредственное отношение к действительности, все же обращает свой взор в пространство вне проводника, когда в связи с явлениями электромагнитной индукции ищет ответа на вопрос об основных и характерных свойствах электрического тока. В какой степени он стремился отрешиться от обычных представлений о токе, свидетельствуют нижеследующие его слова:

«Из двух предположений, весьма обычно принимаемых в настоящее время, о магнитных жидкостях и об электрических токах, первое необходимо признать ошибочным, а может быть и оба ошибочны» («Опытные исследования по электричеству», § 3303). На почве подобных соображений возникло представление Фарадея об особом «электротоническом» состоянии среды в пространстве, окружающем проводник с током, т.-е. там, где распределена вся электрокинетическая энергия тока, в точности равная, как это показал Максвелл, энергии магнитного потока самоиндукции.

7. В своей статье, помещенной в «Encyclopaedia Britannica», Максвелл написал следующие строки по поводу открытия электромагнитной индукции:

«Все величие и оригинальность фарадеевского достижения могут быть оценены путем рассмотрения последующей истории этого открытия. Как и следовало ожидать, оно немедленно сделалось предметом исследований со стороны всего ученого мира, но некоторые из наиболее опытных физиков оказались неспособными избежать ошибок в формулировке изучаемого явления, полагая при этом, что они применяют более научный язык, чем язык Фарадея. До настоящего времени математики, которые отвергли фарадеевский метод формулировки его закона как несоответствующий точности их науки, никогда не были в состоянии установить какое-либо существенно отличающееся соотношение для полного выражения содержания явлений без того, чтобы не вводить гипотез относительно взаимодействия вещей, которые физически не существуют, подобно, напр., элементам токов, которые вытекают из ничего, затем текут по проводнику и, наконец, опять входят в ничто.

«После почти полувековой работы этого рода мы можем сказать, что, хотя практические приложения фарадеевского открытия возросли

и продолжают каждый год возрастать в отношении их численности и ценности, ни одного исключения из формулировки этих законов, данной Фарадеем, не было открыто, ни одного нового закона не было добавлено к ним, и фарадеевская оригинальная формулировка остается по сей день единственной, которая выражает не более того, что может быть установлено экспериментом, и единственной, при помощи которой теория явления может быть представлена так, чтобы она была точна и количественно правильна, оставаясь в то же время в рамках простых методов изложения».

Эти строки были написаны свыше 50 лет тому назад и вместе с тем, однако, содержание их производит такое впечатление, как будто бы они написаны теперь, в наше время. Трудно себе представить более меткую характеристику того разрыва между указанными Фарадеем путями физического мышления и формально-математическими методами рассмотрения физических явлений, — разрыва, который, к сожалению, до сих пор имеет место и даже достиг в последнее время своего апогея. В связи с этим необходимо констатировать, что многое из фарадеевских научных достижений до сих пор еще недостаточно понято и еще недостаточно оценено. Его «Опытные исследования по электричеству» продолжают оставаться арабской книгой за семью печатями для тех, кто вследствие чрезмерного увлечения формальными методами исследования утратил в большей или меньшей степени способность понимать изложенное простыми словами.

Фарадей дал нам лучший образец того, чем должна быть физическая мысль. Он был физик-мыслитель в самом высоком значении этого слова.

Не подлежит никакому сомнению, что математика есть великое орудие, которым физик наших дней может и должен пользоваться при изучении явлений природы. Но зачем же заменять физическую мысль формально-математической символикой и на этом успокаиваться, как будто задачи науки об

основных явлениях реального мира состоят именно в построении отвлеченных символических схем! Необходимо отбросить гордыню и кое-чему поучиться у «переплетчика» Фарадея. Надо последовать примеру Максвелла отложить в сторону все прочее и перечитать от начала до конца фарадеевские «Опытные исследования до электричеству», вдумываясь в каждое слово, написанное их гениальным автором.II

ОСНОВНЫЕ ВОЗЗРЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ [1]

1. Основные воззрения той или иной научной дисциплины представляют глубокий интерес как с чисто философской точки зрения, так, и в отношении перспектив, открывающихся на пути дальнейшего развития этой дисциплины. Некоторый анализ господствующих. воззрений можно признать особенно целесообразным при обозрении наук, которые достигли уже высокой степени развития благодаря большому накопленному материалу, но в то же время встречают какие-либо затруднения в его надлежащем освоении и теоретическом сведе'нии в стройное целое. Современная физика, являясь основной, ведущей наукой о природе в самом широком смысле этого слова, располагает по истине гигантским материалом опытного и теоретического характера. Вместе с тем, однако; быть может, именно благодаря обширности и универсальности современной физики и её проникновению во все другие теоретические и практические дисциплины, ведущие человечество к овладению силами природы, — в значительной степени остро ощущается недостаток общих, признанных всеми руководящих идей, которые могли бы способствовать созиданию единой стройной картины физических явлений, и желательность более или менее отчетливого освещения элементов противоречия, по-видимому, обнаруживающегося в некоторых случаях. На этой почве возникло, не очень, однако ясно оформившееся, тревожное настроение, выразившееся, между прочим, в указаниях на симптомы кризиса, признаки которого усматриваются в современной физике. Я полагаю, что было бы правильнее говорить о несколько своеобразных и вряд ли обоснованных уклонах в современной физической мысли.

2. Времена великих физиков-натурфилософов — времена Галилея, Декарта, Ньютона, Фарадея, Максвелла, Гельмгольца, Кельвина — уже прошли, но, тем не менее, каждый современный физик должен стремиться быть, хотя до некоторой степени натурфилософом. Без определенного философского подхода к исследованию природы физических явлений трудно избегнуть односторонности и, в отдельных, по крайней мере, случаях, ошибочности наших физических представлений.

---

[1] Речь, произнесенная на торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г.

16

И вместе с тем, говоря о физике в мировом масштабе, нельзя не признать, что современная физическая мысль, устремляясь в большинстве случаев в область частных, подчас узких, групп явлений, в общем, не очень культивирует проведение строго обоснованных с... философской точки зрения исходных положений. В этом отношении весьма характерными представляются соображения, высказанные проф. Эренфестом, [1] который занимает в Лейденском университете кафедру Лоренца и является одним из высокоавторитетных европейских представителей современной физики. Вот что он сказал в 1930 г. (цитирую по опубликованной стенограмме одного из его выступлений [2]): «...хороший физик философствует очень редко, и только если ему уже не остается ничего другого, и, если не ошибаюсь, он это делает всегда чрезвычайно плохо. И вот этого-то я боюсь, прямо как огня...» К сожалению, приходится согласиться с проф. Эренфестом в том, что хороший физик в настоящее время философствует очень редко и очень боится это делать, а если уже ему приходится так или иначе прибегнуть к философии, то он использует ее, быть может, недостаточно хорошо. Не подлежит сомнению, что дело обстоит именно так. Но из этого отнюдь не следует, что физик должен, вообще говоря, бояться философствовать. Соприкасаясь с вопросами физики, мы обязаны, я полагаю, хоть в какой-либо степени философствовать. Что же делать, если мы будем выполнять это не совсем хорошо! Лучше так, чем никак! Начав «философствовать чрезвычайно плохо», мы мало-помалу

научимся делать это лучше. Но без какого бы то ни было философского обследования частных и общих проблем физики можно уподобиться тому, кто строит здание, не имея надежного фундамента.

3. В настоящем докладе я поставил своею целью рассмотрение основных воззрений современной физики с точки зрения некоторых условий их возникновения, а также с точки зрения их вероятного соответствия реальному содержанию изучаемых явлений. В связи со сказанным, необходимо прежде всего отметить, что физические представления, долженствующие отображать в нашем сознании, во-первых, объективные реальности, принимающие участие в физических процессах, и, во-вторых, соотношения этих реальностей, создавались в условиях определенной исторической обстановки и до известной степени вытекали из методов, которыми пользовались исследователи, анализировавшие физические явления. В этом отношении особенно сильное влияние оказали приемы и методы математики. Понятия и образы, возникшие на математической почве и являвшиеся весьма полезными и ценными в процессе анализа, нередко трактовались затем в виде каких-то реальностей или в виде неотъемлемых свойств, Присущих данным реальностям по самой природе вещей. Таким образом в физическое мышление проникли представления, которые можно

---

[1] Проф. Эренфест скончался в 1934 г. (Примечание, добавленное 1936 г.).

[2] «Электричество», 1930, № 8, стр. 349.

17

назвать объективированными математическими абстракциями. И все это иногда допускалось без достаточного обследования новых представлений применительно к выяснению их физического значения и к их сообразованию с тем, что может происходить в действительности. Упускалось из вида, в отдельных случаях, и то исключительно важное обстоятельство, что изучение некоторой физической проблемы может допускать использование весьма разнообразных методов математического анализа, каждый из которых требует введения своих особых вспомогательных понятий.

В связи со всем изложенным мы до последнего времени встречаемся с физическими воззрениями, в отношении которых не имеется объективных оснований для того; чтобы их можно было признать адекватными реальному содержанию тех или иных физических явлений.

4. Итак, следует чрезвычайно строго различать символы и вспомогательные понятия, которыми мы пользуемся в процессе математического анализа физических явлений, с одной стороны, и реальное содержание этих явлений, с другой стороны. Конечно, необходимо принять во внимание, что весьма трудно на практике провести указанное разграничение, так как мы познаем природу только через посредство наших ощущений, путем эксперимента, лишь в некоторых случаях имеющего дело непосредственно с ближайшими проявлениями чего-то реально существующего и нами обследуемого. Обычно же в большинстве случаев современный утонченный и сложный физический эксперимент предоставляет нам возможность судить только о каких-либо отдаленных проявлениях предполагаемой объективной реальности, и притом нередко свое окончательное заключение, мы обосновываем на математическом анализе результатов опыта; с известной лишь долей вероятности, используя иногда статистические методы. Все это совершенно справедливо, но, тем не менее, исследователь, изучающий физические явления, на какой бы принципиальной позиции он ни стоял, располагает, как физик, единственной возможностью: последовательно и без всяких отступлений проводить то положение, что предмет его изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания и что в действительности происходит не то или иное в зависимости от нашей точки зрения, а нечто, совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно не подчиненное нашим точкам зрения. Несмотря на все трудности, сопряженные с разделением мира на «субъект» и «объект», одна из основных задач физики заключается именно в проведении возможно более четкой границы между этими двумя областями познания.

5. Проблема пространства и времени издавна занимала умы всех натурфилософов. Последние десятилетия ознаменовались возобновлением углубленной критики наших представлений, относящихся к этой области, и ряд новых идей непосредственно коснулся физики. Эйнштейн в связи

с разработкой общей теории относительности пришел к заключению, что пространственно-временная непрерывность,

18

в которой совершаются физические явления, не есть евклидова непрерывность, и что из этого вытекает ряд следствий, имеющих существенное значение и выражающихся в ощутимых на опыте уклонениях от установленных ранее физических закономерностей, по крайней мере, в условиях космических масштабов. Но, во всяком случае, идея о той или иной пространственно-временной характеристике процессов природы составляет основной фон всякого физического мышления. Вне времени и трехмерного пространства мы не можем себе представить каких-либо физических явлений. Но я позволю себе утверждать более того. Каковы бы ни были наши представления о пространстве, в котором протекают во времени различные физические процессы, будет ли это пространство Евклида, или пространство Лобачевского, или пространство Эйнштейна, или же, наконец, любое иное пространство, хотя бы подчиненное закону квантования, совершенно независимо от всего этого, сколь угодно малым объективно существующим элементам, участвующим в каком-либо физическом процессе, мы обязательно должны приписывать некоторые соответствующие им, не равные нулю, объемы нашего трехмерного пространства. В дальнейшем, ради краткости, я буду называть физическою реальностью всякую объективную реальность, участвующую в каком-либо физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении. Таким образом, я утверждаю, что всякая физическая реальность в целом или сколь угодно малая ее часть обязательно занимает некоторый объем нашего трехмерного пространства.

Настоящее утверждение, по существу, вытекает из всего опытного и теоретического материала, накопленного в области физики. Еще Декарт положил в основание своих рассуждений представление о принципиальной объемной протяженности физических тел и физической субстанции вообще. Он выдвинул положение о немыслимости пространства, не заполненного вечно движущейся материей. До последнего времени физика не рассматривала каких-либо иных физических реальностей. Физика не имеет дела с такими реальностями, о которых можно было бы предположить, что они существуют в некотором пространстве, в число измерений которого не входили бы все три измерения нашего физического пространства. Трудно допустить, чтобы таковое особенное пространство вообще реально существовало. Вполне признавая большую ценность и целесообразность использования идеи о пространствах высших измерений в математических операциях, например, современной квантовой теории волн, признавая полную закономерность этих операций с математическими символами, мы должны строго различать подобные символы от могущих иметь к ним отношение физических реальностей, которые мы обязательно ассоциируем с некоторым объемом трехмерного физического пространства. [1]

---

[1] В последнее время В. А. Фок открыл новые свойства материи, характеризуемые тем, что к некоторым физическим реальностям якобы неприло-

19

Выдвигаемая мною на первый план объемная характеристика физической реальности, как я указал, по существу более или менее явно принимается во всех физических рассуждениях и построениях, но только без достаточной четкости и без надлежащего признания совершенной категоричности тех директив, которые отсюда вытекают. Может показаться, что я, выступая с требованием обязательности объемной характеристики, стучусь в открытую дверь. К сожалению, дело обстоит не так, и на этой почве наблюдаются некоторые нежелательные уклонения как в нашем научном языке, так и в нашем физическом мышлении.

6. Наши физические представления изобилуют образами, являющимися объективированными математическими абстракциями и символами, которые без должных оснований стоят в нашем мышлении рядом с физическими реальностями и весьма часто рассматриваются как нечто эквивалентное физическим реальностям или их подлинным взаимоотношениям.

Остановимся для начала на нескольких простейших примерах. Такие чисто геометрические понятия, как точка, линия, поверхность и объем, как таковой, не могут быть относимы к категории физических реальностей, несмотря на их безусловную полезность и даже абсолютную необходимость при общем и математическом рассмотрении физических процессов. Некоторый вполне определенный объем нашего трехмерного пространства, ничем не заполненный, представляет собою пример чистой абстракции, не имеющей никакого физического содержания. То же необходимо признать и в отношении геометрической поверхности, линии и точки, каждая из которых сверх того не обладает никаким объемом и, следовательно, не удовлетворяет требованиям объемной характеристики физической реальности.[1]

Материальная точка, являющаяся объектом изучения в области теоретической механики, есть не что иное, как математическая абстракция, совершенно необходимая при анализе законов движения, но ни в коем случае не могущая быть рассматриваемой в качестве некоторого реального объекта физического эксперимента, так как объем, занимаемый материальною точкою, равен нулю. Все это, по-видимому, элементарно ясно, а между тем приходится встречаться с противоположными утверждениями и с мнением, что реальное физическое тело можно вообразить состоящим из совокупности определенного количества материальных точек, надлежащим образом распределенных в некотором объеме и, конечно, находящихся в каком-то движении.

жимо понятие пространственно-временной локализации (см. напр., «Известия Академии Наук СССР», серия физическая, 1936, № 1—2, стр. 360; журнал «Под знаменем марксизма», 1938, № 1, стр. 152). Об этих вновь открытых свойствах материи сказано подробнее в статье VII настоящего сборника. (Примечание, добавленное в 1939 г.)

[1] Из сказанного, конечно, не следует, будто бы математические абстракции не отражают ничего реального. Речь идет только о том, что точка, линия, поверхность и объем, как таковой, не являются физическими реальностями в смысле данного выше определения. (Примечание, добавленное в 1939 г.).

20

Вследствие глубоко вкоренившейся всеобщей привычки к объективированию математических абстракций я, несомненно, встречу немало возражений против утверждения, что центр тяжести некоторого тела, во всяком случае, не есть такая реальность, с которой мы можем непосредственно иметь дело в каком-либо физическом эксперименте. Мне скажут, что ведь мы можем же непосредственно как бы осязать центр тяжести тела, можем подвесить тело за его центр тяжести и наблюдать таким образом равновесное состояние тела. На все возражения такого рода я, чтобы не отвлекаться подробным рассмотрением этого специального случая, отвечу кратко: попробуйте подвесить кольцо за его центр тяжести!

В качестве следующего примера объективирования представлений, возникших на почве математического анализа физических явлений, я назову всякого рода векторы. Мы привыкли оперировать с векторами механической силы, силы тяготения, электрических и магнитных сил и т. д., рассматривая их как некоторые физические реальности. Математические теории различных силовых полей составляют один из наиболее замечательных и разработанных отделов современной физики. А между тем все эти векторы являются не чем другим, как только известными математическими абстракциями, облегчающими нам описание и исследование взаимоотношений между несколькими физическими реальностями. Равнодействующая двух векторов есть такая же абстракция, как и исходные векторы или как любые составляющие, на которые, данный вектор может быть разложен. Для выяснения этого вопроса представим себе, например, тяжелый шар, подвешенный на длинной тонкой нити в открытом пространстве при наличии горизонтального ветра. Мы знаем, что в этом случае нить подвеса отклонится от вертикали. С целью разрешения задачи об угле отклонения и в предположении, что давлением ветра на самую нить и ее весом можно пренебречь, а также можно пренебречь и расстоянием точки закрепления нити на поверхности шара от его центра тяжести,— мы должны сложить по правилу параллелограмма вертикальный вектор силы тяжести, равный весу

данного шара, и горизонтальный вектор силы давления ветра на его поверхность. Равнодействующая этих двух сил своим направлением и определит угол отклонения нити подвеса от вертикали.

Спрашивается: существует ли равнодействующая двух рассмотренных сил объективно, т.-е. вне нашего сознания? Конечно, нет. Ведь если бы она существовала объективно, то, следовательно, она действовала бы на шар одновременно с весом шара и давлением ветра на его поверхность, каковые две силы мы, во всяком случае, с большим правом могли бы считать объективно существующими, чем их равнодействующую. Таким образом получилось бы, что к шару одновременно приложены три силы, и натяжение нити подвеса оказалось бы вдвое больше, чем это есть в действительности. Следовательно, равнодействующая сила существует только в нашем воображении. Все происходит не так, как если бы она существовала объективно, т.-е. вне нашего сознания. Но ведь и вертикальный вектор силы тяжести есть

в свою очередь равнодействующая большого количества элементарных сил тяжести, приложенных к отдельным материальным частицам шара. Аналогично и горизонтальная сила давления ветра есть лишь равнодействующая элементарных сил, проистекающих от удара отдельных частиц воздуха о поверхность шара. Наконец, и упомянутые элементарные силы, к которым можно свести все равнодействующие, являются лишь представлениями, символизирующими в нашем сознании тенденции к движению отдельных частей шара, возникающие под влиянием некоторых отчасти известных, отчасти же мало изученных физических процессов.[1]

Ближайшее рассмотрение всех других видов векторов сил, также вообще других групп векторов (скорости, ускорения, вектор Пойнтинга и т. д.) позволяет вскрыть их происхождение как математических абстракций и в то же время, конечно, выяснить, с какими именно проявлениями тех или иных физических процессов их необходимо ассоциировать. Если же, говоря о природе явлений, мы попытаемся вложить в представление о векторе некоторое содержание, выходящее из рамок чисто математической абстракции, обычно весьма необходимой, то мы несомненно пойдем по ложному пути, который может привести нас и в отдельных случаях приводит к отнесению к категории физических реальностей или их физических же соотношений того, что является лишь вспомогательным понятием, вполне законным в процессе математического анализа, но не при рассмотрении сущности явлений.

Итак, на почве объективирования математических абстракций и символов мы иногда вводим в круг наших физических представлений воображаемые образы или фикции. Оперирование с подобными фикциями нередко имеет следствием возникновение ошибочных воззрений, относящихся к природе того или иного физического явления.

7. Я подробнее остановлюсь на особенно ярком и оставившем наиболее глубокий след в развитии физической науки случае объективирования математических абстракций. Я имею в виду actio in distans, т.-е. действие на расстоянии. Представления, вытекающие из этой точки зрения, доминируют в настоящее время и составляют, вообще говоря, неизменный основной фон физической мысли.

---

[1] Здесь иллюстрируется фиктивность разного рода векторов сил (см. Энгельс, «Диалектика природы», 1932, изд. 6-е, стр. 138—140). Никакого противоречия диалектике общего и частного при этом мы не допускаем, вопреки утверждениям А. А. Максимова («Под знаменем марксизма», № 7 за 1937 г., стр. 31). В данном случае «общее» есть совокупность двух механических сил, каждая из которых есть «частное», «отдельное». Конечно, общее существует лишь в отдельном, через отдельное. Однако, когда при анализе результирующего действия совокупности двух механических сил мы вводим понятие о векторе равнодействующей силы, мы имеем дело с фикцией. И хотя эта фикция весьма полезна в процессе анализа, так как она отражает действительные соотношения, но все же это есть фикция, а не объективная реальность, существующая в природе вне нашего сознания. (Примечание, добавленное в 1939 г.).

Известно, что идея о действии на расстоянии, рассматриваемом в качестве первичного физического явления, возникла в связи с работами Ньютона, который дал математическую формулировку открытого им закона всемирного тяготения. Сам Ньютон совершенно неповинен в приписываемом ему некоторыми учеными введении в науку идеи о «физическом» действии на расстоянии. Он ясно понимал, что область применения представлений, казалось бы, диктуемых законом всемирного тяготения, ограничивается рамками математического анализа проявлений тяготения и ни в коем случае не должна быть распространяема на вопросы, касающиеся самой сущности тяготения. Великий математик, показавший весьма совершенные образцы надлежащего использования формулированного им закона и тем положивший основание всей небесной механике, Ньютон, будучи одновременно и великим физиком, вполне отчетливо и достаточно категорически высказал свое мнение о природе тяготения. По этому поводу он писал (в третьем письме к Бентлею): «Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другими на расстоянии через пустоту без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим непрерывно согласно известным законам...»

В развитии математической теории электрических и магнитных явлений роль закона Ньютона сыграли аналогичные, всем известные законы Кулона, относящиеся к электрическим и магнитным взаимодействиям. На почве законов Кулона и их применений создались представления, которые мало-помалу начали внедряться в наше физическое мышление, вообще говоря, без достаточных оснований. Возникло представление о магнитных массах, которые стали трактоваться как некоторые физические реальности. Взаимодействия же этих масс, а также электрических зарядов на расстоянии начали рассматриваться в качестве первичных свойств, присущих им по самой природе вещей. Что касается электрических зарядов, то еще до работ Кулона они получили всеобщее признание в качестве физических реальностей. В какой мере Кулон может считаться причастным к введению в область физики новых представлений, которые совершенно не соответствуют действительности, явствует из следующего. В одном из своих мемуаров, посвященных магнитизму,[1] он говорит: «Из этих экспериментов следует, что, какова бы ни была причина магнитных явлений, все эти явления могли бы быть истолкованы и подвергнуты анализу при посредстве допущения, что в стальных пластинках или в их молекулах находятся две магнитных жидкости, причем частицы жаждой такой жидкости взаимно отталкиваются пропорционально

[1] Coulemb. Collections de Mem. relatifs a'-la Physique, 3, p. 321.

23

их плотности и обратно пропорционально квадрату их расстояния и притягивают частицы другой жидкости в том же отношении...»

Фиктивность магнитных масс вскрылась благодаря исследованиям Фарадея, и это признается в современной физике, хотя иногда и высказываются противоположные суждения.

Работы Максвелла поколебали было обычное представление об электрических зарядах как о чем-то, не зависящем от процессов, происходящих в окружающем пространстве, но развитие электронной теории отодвинуло на задний план идеи Максвелла, и до последних лет не было, казалось, сомнения в том, что электрический заряд, как таковой, есть нечто, самостоятельно существующее. В самое последнее время, однако, в связи с развитием волновой механики наши представления об элементарном электрическом заряде, т.-е. об электроне, приобрели новый характер. Электрон перестает мыслиться в виде обособленной физической реальности, занимающей строго определенный объем. В наших современных представлениях электрон некоторым образом расплывается в окружающем пространстве, теряет свои резкие границы. Сохраняя все же признаки физического индивидуума, электрон как бы обобщается с соответствующим физическим процессом,

происходящим вокруг него, и является только своего рода специфическим гребнем на фоне интерферирующих волн, что на языке квантовой теории волн называется волновым пакетом. Таким образом, намечается сближение с основными воззрениями Максвелла, с учетом, конечно, того богатого материала, которым располагает современная физика в связи с развитием мысли о квантовании в области электромагнитных процессов.

Что касается самой идеи действия на расстоянии, то необходима со всею определенностью констатировать необычайную стойкость этой псевдо-физической идеи. До самых последних дней современная физика в лице многих своих представителей трактует действие на расстоянии как нечто, вполне отвечающее природе вещей, как первичное физическое явление. И это наблюдается, несмотря на глубоко философское содержание всех трудов Фарадея, Максвелла, Герца. Объяснение нужно искать в чрезмерном влиянии на наше физическое мышление методов математического анализа. Широкое и плодотворное использование высшего анализа при изучении физических явлений, необычайная утонченность и, я бы сказал, изящество многих методов этого анализа естественно приводят к тому, что ученые, работающие в области физики и, вообще говоря, весьма совершенно владеющие всем аппаратом высшего анализа, до известной степени непроизвольно объективируют формы и образы, являющиеся чистыми математическими абстракциями. Форма выдвигается на первый план, заслоняя собою содержание. В этом отношении мы имеем дело с чем-то, аналогичным наблюдаемому в литературе и в изобразительных искусствах, где время от времени возникают течения, ставящие форму выше содержания.

Как всем хорошо известно, точке зрения действия на расстоянии противопоставляется фарадее-максвелловская точка зрения, утверж-

24

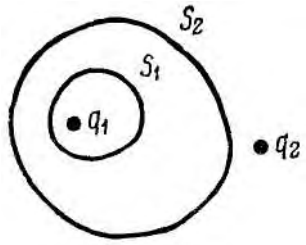
дающая, что все взаимодействия в природе осуществляются не иначе, как через посредство физических процессов, которые происходят в пространстве, окружающем взаимодействующие физические центры. Так как пространство не может быть физически мыслимо без заполняющей его какой-то среды, то, следовательно, фарадее-максвелловская точка зрения считается с участием среды во всех физических взаимодействиях. Возникновение этой точки зрения становится вполне понятным с психологической стороны, если вспомнить, что гениальный Фарадей не обладал математическим образованием и своих идей никогда не выражал в математической форме. Его физическое мышление, таким образом, было совершенно свободно от какого бы то ни было влияния или гипнотизирующего воздействия со стороны математической символики. Фарадей оперировал непосредственно с конкретными физическими образами и представлениями, подвергая их всесторонней критике в процессе экспериментального обследования. Вместе с тем он не боялся философствовать и уделял большое внимание общему рассмотрению природы вещей и их соотношений. В частности, он высказал много глубоких по своему содержанию соображений по поводу роли среды, в противовес точке зрения действия на расстоянии, и при этом имел обыкновение ссылаться на авторитет Ньютона, напоминая цитированные выше слова из его переписки с Бентлеем. Нельзя не признать, что отмеченное выше устремление Фарадея в сторону содержания, а не формы, явилось одним из очень серьезных моментов, содействовавших развитию в нем способности дать нам высокие, никем не превзойденные образцы подлинно физической мысли.

Максвелл, полностью разделявший с Фарадеем его основные воззрения и явившийся их интерпретатором, используя для этой цели язык математики, принял, если можно так выразиться, специальные меры к тому, чтобы в его мышлении форма не заслонила содержания. В предисловии к своему «Трактату об электричестве и магнетизме» Максвелл касается вопроса об особенном характере этого труда, отличающим его от других трудов такого же рода, опубликованных, главным образом, в Германии, и приводит по данному поводу следующее разъяснение: «Одна из причин состоит в том, что прежде чем я начал изучать электричество, я принял решение не читать никаких математических сочинений, посвященных настоящему вопросу, до прочтения фарадеевских «Опытных исследований по электричеству» от начала до конца».

Можно выразить сожаление, что пример Максвелла находит мало подражателей, а между тем это был бы один из лучших путей развития в нашем подрастающем поколении молодых физиков наклонности к физическому мышлению, возможно более свободному от влияния Математических абстракций.

8. Современная физическая мысль, как было уже отмечено выше, Может быть охарактеризована отрицательным отношением к непременному участию среды во всякого рода физических взаимодействиях. Я позволю себе разобрать два примера, которые особенно наглядно

25



Фиг. 1.

иллюстрируют на конкретных случаях принципиальные расхождения точки зрения действия на расстоянии и противоположной точки зрения. Представим себе два электрические заряда q_1 и q_2, расположенные на определенном расстоянии один от другого (фиг. 1). Допустим, что некоторые две замкнутые поверхности S_1 и S_2 окружают со всех сторон заряд q_1, нигде не касаясь одна другой и не пересекаясь. Спрашивается :

Могут ли заряды q_1и q_2 взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом в слое, ограниченном поверхностями S_1 и S_2, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

С точки зрения действия на расстоянии на этот вопрос необходимо ответить «да». С точки зрения Ньютона, Фарадея и Максвелла единственным правильным ответом будет самое категорическое «нет».

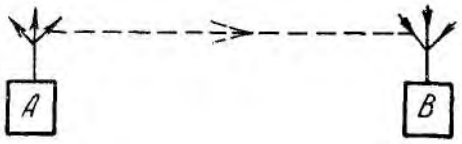
Ответ «да», казалось бы, заключает в себе нарушение основных геометрических свойств физического трехмерного пространства. Объяснить действие на расстоянии можно было бы только путем допущения обязательной связи физических реальностей, в данном случае зарядов q_1 и q_2, с какими-то процессами, происходящими где-то за пределами нашего трехмерного пространства. Но такого рода объяснения мы не называем физическими, и рассмотрение их лежит вне темы настоящего доклада.

Ответ «нет» представляется совершенно естественным с физической точки зрения и по существу вытекает из закона причинности и объемной характеристики всякой физической реальности. Строго говоря, ответ «нет» можно было бы обосновать одной только обязательностью этой объемной характеристики, так как самый закон причинности в том виде, как мы его понимаем при изучении физических явлений, теряет всякий смысл, если мы допустим существование физической реальности, не занимающей в нашем трехмерном пространстве никакого объема, т.-е. являющейся одновременно физическим «ничто».

Цитированные выше слова проф. Эренфеста были сказаны именно по поводу вопроса, подобного тому, который мы теперь разбираем. Он, кроме того, выражал мнение, что спор между фарадее-максвелловским взглядом и точкой зрения действия на расстоянии должен быть разрешен при помощи какого-либо специального experimentum crucis. Мне же представляется, что этот спор может и должен быть разрешен путем чисто логического рассмотрения простейших случаев. Какой бы experimentum crucis мы ни поставили, результаты его всегда можно пытаться трактовать математически и с той, и с другой точки зрения. Подтверждение сказанному можно найти в истории вопроса о распространении электромагнитных возмущений.

В качестве второго примера рассмотрим случай беспроволочной

26



Фиг. 2.

передачи электромагнитной энергии от некоторой радиостанции *A* (фиг. 2), сигналы которой получаются приемной станцией *B*. Предположим, что расстояние между этими станциями очень велико и равно, например, десяти световым годам. В то время, когда станция *A* посылает свои радиосигналы, приемная станция *B*, допустим, еще не существует. После того как станция *A* послала свою радиотелеграмму в окружающее пространство, мы можем ее совершенно разрушить, так что она больше не существует. Затем, по прошествии девяти лет приступим к сооружению приемной станции *B* и закончим ее до истечения десяти лет. Ясно, что ровно через десять лет с момента посылки радиосигналов станцией *A* мы примем эти сигналы станцией *B*.

Как необходимо понимать рассматриваемое явление с точки зрения Фарадея и Максвелла и с точки зрения действия на расстоянии, на почве которой стоит современная электронная теория?

Фарадее-максвелловская точка зрения учит нас, что электромагнитная энергия, излученная радиостанцией *A* и являющаяся энергией какого-то специфического сложного движения среды, вместе с этим движением распространяется при ближайшем участии среды в более и более удаленных районах и, в конце концов, некоторая доля первоначально излученной энергии достигнет приемной станции *B*, возбудив в ее антенне электрические колебания, усиливаемые далее надлежащим образом и воспринимаемые в качестве сигналов, посланных станцией *A*.

Точка зрения действия на расстоянии, сильно поколебленная в своих позициях открытиями Герца, выходит из затруднений при объяснении рассматриваемого явления введением в физическую науку представления о так называемом запаздывающем действии на расстоянии. Таким образом, с этой точки зрения электроны, колеблющиеся вперед и назад вдоль антенны отправительной радиостанции *A*, действием на расстоянии приводят в соответствующее колебание электроны в приемной антенне станции *B*, но только это действие на расстоянии запаздывает ровно на десять лет.

Внешне все как будто обстоит совершенно благополучно, и не может возникнуть никаких возражений с чисто формальной стороны. Однако дело принимает совсем иной оборот, если мы пытаемся задать вопрос: а где в течение десяти лет пребывала излученная радиостанцией *A* электромагнитная энергия?

Ответ с фарадее-максвелловской точки зрения не нуждается в пояснениях. Позиция же современной электронной теории приводит к ряду безысходных противоречий. Действительно, если среда не принимает никакого участия в процессе передачи электромагнитной энергии от станции *A* до станции *B*, то необходимо утверждать, следовательно, что эта энергия, как таковая, вообще нигде не суще-

27

ствует в течение десяти лет, другими словами, совершенно исчезает из нашего трехмерного пространства. Но в таком случае, по какой причине некоторая незначительная доля ее внезапно рождается в антенне станции *B* ровно через десять лет? Где даются директивы, во исполнение которых энергия вдруг появляется в физическом трехмерном пространстве в точно указанный момент? Здесь мы имеем дело с несомненным нарушением закона сохранения энергии и закона причинности.

Необходимо отметить, что в современной квантовой теории волн приходится встречаться с указаниями на необходимость отказа от закона причинности в применении к явлениям, протекающим в микрокосмических условиях. Разобранный пример показывает, что уклонения от фарадее-максвелловской точки зрения приводят нас к отказу не только от закона причинности, но и от закона сохранения энергии даже в масштабах макрокосмоса.

С точки зрения действия на расстоянии необходимо считать в высокой степени непоследовательным, что электронная теория, чтобы как-либо избавиться от явных противоречий в отношении излученной

электромагнитной энергии, в конце концов, вынуждена прибегнуть к указанному Максвеллом объемному интегрированию, дающему количество энергии электромагнитного поля и имеющему физический смысл только с фарадее-максвелловской точки зрения, от которой современная электронная теория четко отмежевывается. В таком же затруднительном положении эта теория оказывается и в ряде других случаев, между прочим, при решении вопроса о самом простом и самом важном случае проводимости, именно при рассмотрении сверхпроводимости, которая принципиально не может быть описываема на языке электронной теории, пока последняя будет игнорировать участие среды.

После всего изложенного выше можно в полной мере оценить глубокое значение слов О. Д. Хвольсона, который в своем «Курсе физики» говорит: «Термином actio in distans, т.-е. действие на расстоянии, обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие...». [1]

9. В последнее время приходится иногда встречать указания, что физик должен синтезировать такие две противоположности, как точку зрения действия на расстоянии и фарадее-максвелловскую точку зрения. Не отрицая большого значения синтеза противоположностей как мощного средства, которым мы должны пользоваться в научной работе, я все же полагаю, что, прежде чем обращаться к синтезу, необходимо предварительно подвергнуть тщательному анализу самые противоположности, с точки зрения их совместимости в данной области и соответствия природе вещей. Может оказаться, что некоторые две противоположности совершенно непримиримы. Например, вряд ли можно синтезировать в области тригонометрии два противоположных утверждения: $\cos\varphi<1$ и $\cos\varphi>1$. Но может

---

[1] О. Д. Хвольсон. Курс физики, т. I, 1923, стр. 181.

случиться, что данные противоположности, непримиримые в одной области, могут быть синтезированы в другой. Это именно и имеет место в отношении точек зрения действия на расстоянии и фарадее-максвелловской. Они вполне примиримы, и их можно синтезировать в качестве методов математического анализа явлений природы. Как известно, Максвелл дал их математический синтез в своем «Трактате об электричестве и магнетизме» и показал, что обе точки зрения в ряде случаев математически совершенно эквивалентны и приводят к одним и тем же результатам, хотя практически они и не во всех случаях одинаково удобны. Путем простых математических преобразований легко можно перейти от символов, определяемых одной точкой зрения, к символам, соответствующим другой. Но совершенно иначе обстоит дело, если мы будем пытаться синтезировать эти точки зрения в области физического мышления в связи с вопросом о природе явлений. В этом случае они совершенно непримиримы и взаимно исключают одна другую. Одна, по-видимому, соответствует природе вещей, а другая представляет собою математическую абстракцию, не имеющую физического смысла. Ведь в действительности имеет место некоторое совершенно определенное первичное физическое явление, которое не может быть либо тем, либо другим (в зависимости от нашей точки зрения), либо одновременно и тем, и другим. Как можно синтезировать ответы «да» и «нет» на вопрос, относящийся к фиг. 1? Мыслимо ли построить такую физическую теорию, чтобы можно было утверждать, что в слое между поверхностями S_1 и S_2 в одно и то же время и происходит какой-то физический процесс, и решительно ничего не происходит? Направляя нашу мысль на развитие обоснований такого утверждения, мы делали бы нечто подобное тому, как если бы мы, например, в области математики, стремились доказать одновременную справедливость двух положений: 2X2=5 и $2\times 2\neq 5$. Что-либо одно: либо «да», либо «нет», в зависимости, так сказать, от «точки зрения». Никакой синтез противоположностей в рассматриваемом случае неприменим. Допуская противное, мы вступаем на очень опасный путь, чреватый весьма печальными последствиями.

10. Перейдем теперь к рассмотрению одного из самых важных представлений, с которыми оперирует современная физика. Речь идет об идее квантования во всех физических процессах, вообще, и в

области электромагнитных процессов, в частности. При этом термин «квантовании»[1] я понимаю в самом широком смысле. Трудно подыскать достаточно яркие слова для того, чтобы с необходимою отчетливостью выявить громадное значение этого основного воззрения, которое должно признать поистине величайшим достижением современной физики, дающим нам ключ к углубленному пониманию явлений природы.

Сущность общего представления о квантовании заключается в признании того, что во всех наблюдаемых нами явлениях природы мы встречаемся с некоторыми элементарными реальностями, каждая из которых может быть рассматриваема в известном смысле как некое

29

самостоятельное целое. Так, мы имеем дело с молекулами и атомами материальных тел, с электронами и протонами, входящими в состав материального атома, с определенными порциями лучистой энергии, применительно к которым и был впервые введен термин «квант». В волновой механике своего рода квантом является волновой пакет. С представлением о квантовании мы встречаемся в современной физике повсюду, в особенности при изучении микрофизических явлений, к каковой области относятся и вопросы, касающиеся строения атома. Вне этого представления современная физическая мысль совершенно не может работать и развиваться.

Как известно, истоки идеи о квантовании надо искать в глубокой древности, в форме представления об атомах, из которых состоят все тела. Основные черты атомистического учения имеются в некоторых, системах древнейшей индийской философии. У философов древней Греции — у Левкиппа, Демокрита, Эпикура — атом играет существенную роль в их представлениях о природе. Римский поэт и философ Лукреций пропагандирует атомистическое учение. В позднейшие времена идея об атоме, между прочим, весьма своеобразно отразившаяся в натурфилософских построениях Декарта, мало-помалу начинает приобретать все больше и больше сторонников, и, в конце концов, теперь, после ряда великих открытий в области физики и химии, мы уже перестали говорить об атоме как о некоторой гипотезе. Несомненно, современной физике мы обязаны последними, самыми трудными этапами на этом долгом и подчас извилистом пути.

Представление об элементарном количестве электричества преемственно связано с атомистическим учением в области материи. Уже Фарадей, открывший законы электролиза, совершенно отчетливо понял, что эти законы требуют для своего объяснения, с одной стороны, признания интимной связи между материей и электричеством и, с другой стороны, существования некоторого минимального количества электричества, которое должно быть ассоциировано с зарядом самого легкого, т.-е. водородного, иона и кратные которого являются зарядами всех без исключения других ионов. В связи с этим Фарадей определенно говорит об «абсолютном количестве электричества» именно в том смысле, в каком мы теперь говорим о зарядах электрона и протона, и даже объясняет, по каким мотивам он избегает применять в отношении элементарного количества электричества термин «атом». [1] После Фарадея те же законы электролиза дают повод Веберу, Максвеллу, Гельмгольцу и другим ученым высказывать свои соображения по вопросу об атомной структуре электричества и, таким образом, идея об элементарном количестве электричества в значительной степени созрела к моменту, когда ряд открытий из различных областей — проводимость газов, явление Зеемана, радиоактивность — позволили современной физике выполнить важнейшую, заключительную часть работы и создать представление

---

[1] Faraday. Experimental Researches in Electricity, §§ 852, 869, 870.

30

об электроне, безусловно отвечающее определенной физической реальности.

С именем Планка мы связываем введение в круг физики представления о квантах лучистой энергии. Можно, конечно, усматривать преемственную связь между современной корпускулярной теорией излучения и ньютоновой теорией истечения, зерно истины в которой на долгие годы было заслонено классической волновой теорией света. Величайшая заслуга современной физики состоит в том, что она выявила это зерно истины и взрастила его, облекши в формы квантовой теории, которая,

непрерывно развиваясь, привела к квантовой теории волн и, можно надеяться, закончит намечающийся уже теперь синтез корпускулярных и волновых представлений, обычно рассматриваемых в качестве некоторых противоположностей. Современная квантовая теория волн, по существу, подготовляет почву для этого синтеза не только в отношении электромагнитного излучения, но и в связи с нашими представлениями об элементах материального атома, каковыми являются электроны и протоны. Трудным местом в физическом освоении некоторых представлений этой теории является пока то обстоятельство, что она лишь в простейших случаях оперирует с волновыми процессами, интерпретируемыми как некоторые волны в пределах нашего трехмерного пространства, в общем же случае ее математические операции относятся к пространствам высших измерений. Но, конечно, квантовая теория волн является еще очень молодым, хотя и многообещающим, детищем современной физики, и можно далеко идти в своих ожиданиях в связи с несомненным ее дальнейшим развитием.

Наконец, идея о квантовании сыграла очень большую роль и в разработке современного учения о строении атома. Квантовым условиям подчиняются орбиты, по которым движутся электроны, входящие в состав атома. Надо полагать, что это должно будет найти себе объяснение в свойстве самих электронов претерпевать какие-то специфические изменения в пределах некоторых квантовых условий. Это тем более вероятно, что электрон теперь мыслится в качестве, недостаточно хотя еще изученного, сложного комплекса электромагнитного характера. Физически понять квантование орбит внутриатомных электронов иначе невозможно, так как орбиты, сами по себе, являются чисто геометрическими представлениями, при помощи которых мы лишь описываем поведение физических реальностей, образующих в совокупности атом. Но выяснение физического смысла принципиально необходимых постулатов Бора есть дело будущего.

В ряде отделов квантовой теории остается еще, само собою разумеется, очень много весьма ответственной работы; однако, во всяком случае то, что уже сделано, представляет собою одну из блестящих страниц в истории физики вообще.

Так как, по существу, электромагнитная концепция физических явлений все более и более укрепляется, так как квантовая теория. В конце концов, всегда имеет дело с каким-то электромагнитным

31

комплексом той или иной сложности, то будет уместно отметить к истории вопроса о квантах, что первые указания на квантование в области процессов электромагнитного характера можно и, по моему мнению, необходимо усмотреть не только в соображениях Фарадея по поводу законов электролиза, но и в его идеях о физически существующих элементах магнитного потока. Хотя физическая наука нашего времени в большинстве случаев не оперирует с этим представлением Фарадея, играющим столь важную роль в практическом использовании магнитного потока, однако общий ход развития этой науки позволяет думать, что она к нему так или иначе вернется, подобно тому, что мы можем уже констатировать в отношении ньютоновой корпускулярной теории света, т.-е. теории истечения.

11. Математический аппарат квантовой волновой теории изобилует применением абстракций, многие из которых вряд ли могут претендовать на то, чтобы получить какое-либо физическое содержание. Не говоря уже о том, что некоторые математические абстракции этой теории явно выходят за пределы нашего трехмерного пространства, возбуждает тревогу определенная тенденция к отрицанию грани между объектом и субъектом. Это замечание в особенности касается так называемого соотношения неопределенности, которое может служить наиболее современным примером объективирования представлений, возникающих на почве математического анализа данных физического опыта. Не подлежит ни малейшему сомнению, что делается большой шаг вперед благодаря установлению пределов точности опытного определения отдельных положений электрона или какого-либо иного кванта, с которым мы встречаемся в области микрофизики. Весьма важно знать пределы, которых нельзя перейти по соображениям принципиального характера и наличие которых вносит известную неопределенность в наши суждения о результатах опыта. Все это

завершает многолетнюю работу в области анализа и критики данных физического опыта и в указанном смысле является очень значительным достижением. Но, по моему мнению, необходимо отнестись весьма отрицательно к склонности современной физической мысли объективировать соотношение неопределенности, играющее сравнительно большую роль в микрофизических явлениях. Почему, например, выдвигается положение, согласно которому понятие «траектория движущегося электрона» должно терять свой смысл для области малых квантовых чисел? Из того, что на опыте в этом случае мы можем определить, допустим, одну единственную точку и то лишь с известной долей вероятности, отнюдь не вытекает отсутствие какого бы то ни было движения электрона в физическом трехмерном пространстве, если только представление об электроне соответствует некоторой физической реальности. Ведь если нам удастся определить только одно положение какой-либо впервые открытой малой планеты, и затем она по той или иной причине сделается недоступной для наблюдения, мы никак не можем лишить себя права рассуждать о вероятной траектории движения этой пла-
32
неты или, в случае распадения ее на части, о вероятных траекториях движения отдельных ее частей.
Можно было бы, конечно, говорить о том, что в области малых квантовых чисел или в каких-либо других условиях электрон лишь внезапно возникает в известном месте, а до этого момента и после него электрон, как таковой, вовсе не существует. Быть может, это иногда имеет место, в особенности, например, после момента наблюдения, когда мы воздействуем на электрон со стороны наблюдающей системы. Однако в таком случае периоду небытия электрона, как такового, должен соответствовать некоторый процесс (волнового, допустим, характера), и данный процесс должен иметь место не в области какого-то особого пространства высших измерений, вне пределов физического трехмерного пространства, а обязательно должен протекать именно в этом трехмерном пространстве, будучи надлежащим образом координирован относительно места последнего наблюдения электрона. Мы опять же будем иметь право говорить о траектории распространяющегося в пространстве процесса, понимая все это в более общем смысле.
Отказываясь от какого бы то ни было прямого или распространительного представления о траектории электрона, объективируя соотношение неопределенности в этом и ряде других случаев, а также, конечно, обязательно принимая все вытекающие отсюда последствия, физик рискует выйти весьма далеко за пределы физики и, в первую очередь, приходит к конфликту с законом причинности, о чем было упомянуто выше.
12. Представление о квантовании в самом широком его понимании заключает в себе идею о пространственной прерывности всех вообще физических процессов. И вместе с тем, оставаясь в области физической мысли и стремясь по возможности освободиться от чисто математических абстракций, мы должны совершенно отбросить какое бы то ни было оперирование с пространством, абсолютно пустым, в полном смысле этого слова. Следовательно, прерывность физических процессов мы не можем мыслить в связи с абсолютно пустыми промежутками между отдельными элементами — квантами, на которые мы расчленяем физическое содержание того, что происходит в. природе. Подобные абсолютно пустые промежутки физически недопустимы. О них можно говорить только в пределах математического анализа. Таким образом, прерывности физически мыслимы только на фоне физической же непрерывности.
Мы никак не можем ограничиться констатированием сосуществования прерывности и непрерывности, приняв его просто как основное положение, не требующее дальнейшего развития. Физическая мысль не может на этом успокоиться, а, наоборот, она должна стремиться и действительно стихийно стремится к синтезу этих противоположностей, каждая из которых, несомненно, выражает собою нечто объективно реальное. Должно признать, что на пути решения рассматриваемого, по существу, очень старого вопроса встречается
33
много затруднений, кажущихся почти непреодолимыми. Но как раз именно развитие квантовой теории волн, которым современная физика может по справедливости гордиться, явно ведет к тому,

чтобы был, наконец, выполнен физический синтез прерывности и непрерывности. Собственно говоря, для простейшего случая, когда можно говорить о пакете максвелловских волн, математический аппарат этой теории с формальной стороны уже выявил искомый синтез. Остается только задать вопрос: что именно колеблется в связи с волновым процессом? При этом, конечно, мы должны отрешиться от представления о простом колебательном движении, составлявшем предмет изучения в области классической волновой теории света, а иметь в виду колебательный характер какого-то специфического состояния той физической реальности, которой свойственно приобретать это состояние и которую мы на обычном нашем физическом же языке не умеем называть иначе, как некоторой средой. Помимо указанного пути трудно представить себе какой-либо иной метод физической трактовки понятий, вытекающих из квантовой теории волн. Необходимо подчеркнуть, что математик имеет полное основание не интересоваться тем, что именно колеблется, но для физика вопрос этот имеет принципиальное значение. Абсолютно пустое пространство, лишенное всякого физического содержания, не может служить ареной распространения каких бы то ни было волн.

Развивая мысли в намеченном направлении и стремясь использовать представление о волнах в трехмерном пространстве также в отношении самого общего случая, чего мы пока не умеем осуществить путем операций с уравнением Шредингера, мы можем надеяться притти, в конце концов, к полному физическому синтезу указанных выше противоположностей — прерывности и непрерывности. При этом все прерывности представятся в форме каких-то, более или менее ярко выраженных пучностей в процессе, который происходит на фоне физической непрерывности, заполняющей все трехмерное пространство, т.-е. на фоне некоторой среды.

13. Мы подошли, наконец, к самому существенному вопросу, когда-либо занимавшему физическую мысль, — к вопросу о физической среде, без которой наше трехмерное пространство являлось бы только какой-то чисто математической абстракцией.

Современная физика, склонная усматривать в действии на расстоянии первичное физическое явление, относится отрицательно к этому вопросу. Представление о среде, заполняющей все пространство и непосредственно участвующей во всех физических процессах в качестве передатчика всякого рода взаимодействий, рассматривается теперь как некоторые, так сказать, леса, которые необходимы были при возведении здания современной физической теории. Когда сооружение здания закончено, леса могут быть разобраны и отброшены прочь, как нечто ненужное и уже окончательно сыгравшее свою подсобную роль. Все это совершенно верно с точки зрения формально-математического понимания того, чем должка быть 34

физическая теория. В этом отношении не может быть никаких возражений. Но дело представляется совсем в другом виде, если под физической теорией разуметь строго обоснованную и не содержащую внутренних противоречий систему взаимно-согласованных физических представлений. В этом случае роли меняются. Методы и язык математического анализа необходимо рассматривать только в качестве лесов, облегчающих возведение здания физической теории путем выявлении количественных соотношений и характеристик физических реальностей. С развиваемой мною точки зрения, леса, облегчавшие построение физической теории, по окончании этой работы мы разбираем, но не отбрасываем прочь, и в дальнейшем пользуемся материалом этих бывших лесов, т.-е. приемами математического анализа, при некоторых частичных надстройках, могущих потребоваться в связи с новыми открытиями, а также при всякого рода описании и практическом использовании физической теории. Таким образом, с точки зрения природы вещей математические построения и формулировки не составляют сущности физической теории, а играют в ней лишь подсобную, хотя и весьма важную роль.

По целому ряду причин, о которых я уже достаточно говорил, построение физической теории, охватывающей весь материал, накопленный наукою, немыслимо без признания особенного значения среды, заполняющей все трехмерное пространство. На языке прошлых эпох, пережитых физикою, эта универсальная среда называется эфиром. За неимением другого, быть может, более подходящего термина мы будем продолжать пользоваться словом «эфир» в смысле какой-то основной среды,

непрерывно заполняющей пространство, хотя современная физика весьма тщательно избегает представления об эфире, как бы совершенно в нем не нуждаясь.

Специальная и общая теории относительности отвергают эфир, и вместе с тем, однако, Эйнштейн признает, что геометрические свойства пространства не самостоятельны, а обусловлены материей. Казалось бы, что это утверждение Эйнштейна влечет за собою отрицание физического смысла в представлении о каком-либо объеме пространства, абсолютно свободном от материи. Тем не менее, из хода рассуждений общей теории относительности следует, что здесь речь идет лишь о гравитационной материн, а не о материи в более общем смысле некоторой физической среды, непрерывно заполняющей пространство. Такая универсальная среда не требуется согласно теории относительности, которая допускает существование областей трехмерного пространства, абсолютно ничем не заполненных. Все это, конечно, указывает на абстрактно-математический характер этой теории.

Теория относительности оперирует с полем тяготения. Современная теория электромагнитных явлений основана на развитии учения о полях электрических и магнитных. Но математическая теория силового поля, по существу, теснейшим образом связана

35

с идеей действия на расстоянии, простого или запаздывающего. Поэтому современное представление о каком-либо силовом поле является такой же математической абстракцией, как и действие на расстоянии, и точно так же обычно объективируется без достаточных оснований. Вложить физическое содержание в учение о силовых полях можно, только вернувшись к основным фарадее-максвелловским воззрениям, касающимся обязательного участия некоторой среды во всех взаимодействиях, и тогда современное учение о силовом поле необходимо будет рассматривать в качестве весьма ценной математической характеристики физического силового поля. Итак, признание какой-то универсальной среды, скажем, эфира, безусловно, необходимо для развития физической мысли, которая в противном случае приходит к ряду существенных противоречий.

В настоящее время мы не располагаем достаточными материалами для построения физической теории эфира. В этом отношении наибольшие затруднения возникают при рассмотрении вопроса о непрерывности эфира, который необходимо трактовать в качестве какой-то основной среды, являющейся первичной физической реальностью [1] и не оставляющей абсолютно незаполненными сколь угодно малые объемные участки нашего трехмерного пространства. Быть может, однако, мы никогда не будем в состоянии «понять» непрерывности эфира по чисто принципиальным причинам. Дело в том, что обычное «понимание» чего бы то ни было всегда, так или иначе, сопряжено с подчинением содержания данного объекта более общей [2] категории объектов. Так, например, понимание того, что представляет собою материальное тело, сводится к идее об атомах и об атомной структуре. Атомы мы понимаем как определенные комплексы электронов и протонов, а электроны и протоны мы теперь стремимся понять, хотя бы, как некоторые волновые пакеты. Мысля о предельной физической субстанции, об эфире, мы не можем, по-видимому, идти по этому проторенному пути, так как мы не можем себе представить существования сверхпредельной физической субстанции, некоторого над-эфира. Эфир, по моему мнению, является в отношении его непрерывности своего рода «непознаваемым».[3] В этом, вероятно, кроется основная причина затруднений в построении физической теории эфира, и я полагаю, что если это будет, наконец, когда-либо выполнено, то лишь на базе постулата о непре-

---

[1] Говоря об эфире как о первичной физической реальности, мы должны, конечно, это понимать в том смысле, что на данном этане наших физических знаний представление об эфире является некоторым пределом конкретизации наших представлений о материи вообще. (Примечание, добавленное в 1949 г.)

[2] Более «общей» с точки зрения структуры объектов природы (1936).

[3] Из этого утверждения, конечно, не следует, что эфир в полном смысле слова непознаваем. Речь идет лишь о том, что не следует рассматривать эфир по аналогии с обычной, так называемой,

весомой материей и приписывать ему атомную структуру. Но мы должны стремиться познать эфир путем всестороннего изучения его проявлений в качестве совершенно необходимого и основного носителя свойств, обнаруживаемых в физических процессах, вообще, и в электромагнитных процессах, в частности (1936),

36

рывности эфира. Данный постулат, несомненно, должен быть внутренне связан с положением о физической немыслимости, о фиктивности абсолютно пустого пространства.

14. Из всего предыдущего вытекает, что создание физической теории, охватывающей самый широкий круг явлений, затруднительно и, вероятно, совершенно невозможно на почве отрицания первенствующего значения среды и на основе объективирования действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. До настоящего времени; общей физической теории еще не существует в законченном виде. Но можно с полным правом высказать уверенность, что в будущем физическая мысль возвратится к принципиальным воззрениям Фарадея и Максвелла, разовьет их путем учета всех новейших достижений и завершит построение общей физической теории. Действительно, уже намечается определенный, еще недостаточно осознанный, сдвиг в этом направлении. В. подтверждение сказанного достаточно напомнить хотя бы только о квантовой теории волн, о метаморфозе наших представлений об электроне и о дифракции материальных лучей. Но, во всяком случае, фарадее-максвелловская точка зрения по вопросу о непременном участии среды во всех физических процессах представляется единственной мыслимой путеводной нитью для дальнейшего успешного развития современной физики, так много сделавшей и так много обещающей сделать.

III
О «ФИЗИЧЕСКОМ» ДЕЙСТВИИ НА РАССТОЯНИИ [1]

I. История науки изобилует примерами преходящих стадий в понимании явлений окружающего нас мира. Непрерывно, в процессе накопления новых фактов и длительной работы научной мысли, наши представления подвергались метаморфозе, последовательно освобождаясь от всего, не выдерживающего строгой критики, и постепенно рафинируясь в смысле возможно большого приближения к соответствию с тем, что происходит в действительности. Так, птоломеева система мира уступила место системе гелиоцентрической. Учение древних философов о четырех основных началах-стихиях: воздухе,

воде, земле и огне — прошло путь долгой эволюции. В связи с этим

можно, между прочим, помянуть многочисленные, упорные искания алхимиков, приведшие к накоплению ряда новых конкретных данных о веществе, и мучительные блуждания человеческой мысли, стремившейся постигнуть энергетическую сторону явлений природы и делавшей на этом пути не мало ложных шагов вроде, например, увлечения теорией флогистона. Наконец, благодаря развитию химии и физики, древнее, кажущееся теперь наивным, учение о четырех основных началах трансформировалось в наши современные знания о строении вещества и о его превращениях, связанных с энергетическими процессами вообще, и тепловыми, в частности. Представление об атоме как о последней неделимой частице вещества, благодаря ряду великих открытий, имевших место в самое последнее время, заменилось картиной целого микрокосмоса, сложное строение и законы которого теперь так напряженно изучаются во всем мире. Физическая реальность, называемая электрическим зарядом, понимается в наши дни несколько иначе, чем 100 лет тому назад. Даже за последние 10 лет произошли несомненные сдвиги в этом отношении. Магнитная масса, считавшаяся некогда подлинною физическою реальностью, в настоящее время рассматривается лишь как некоторая фикция, имеющая чисто вспомогательный характер при математическом изучении свойств магнитного ноля.

Во всяком случае, несомненно, что и наши современные физические представления в ближайшем будущем претерпят некоторые

[1] Доложено к Общем собрании Академии Наук СССР 4 октября 1933 г.

38

изменения, как в отношении формы, так и в отношении содержания, последовательно приближаясь к пределу, по вопросу о достижимости которого могут быть разные мнения.

2. В своей речи «Основные воззрения современной физики», читанной в годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г.,[1] я коснулся господствующего в настоящее время представления о действии на расстоянии, рассматриваемом в качестве первичного физического явления и в этом смысле названном мною «физическим» действием на расстоянии.

Я утверждаю, что это представление не соответствует природе вещей, не выдерживает строгой критики и потому является преходящей стадией в наших общих физических воззрениях. Имея характер математической абстракции, ценной лишь в области формальной трактовки физических процессов, представление о действии на расстоянии не может служить базой при рассмотрении существа явлений, происходящих в реальной обстановке.

Два мотива руководили мною, когда я счел необходимым еще раз выступить по данному поводу и сделать некоторые дополнения к тому, что было уже сказано в моей речи.

Первый, основной мотив заключается в том, что признание возможности «физического» действии на расстоянии приводит к целому ряду весьма существенных выводов, с которыми, по моему мнению, никак нельзя примириться. В своей речи я уже отметил некоторые явные недоразумения, возникающие на почве отрицания фарадее-максвелловского представления о непременном участии среды во всех физических взаимодействиях. Между прочим, я указал в виде примера, что современная электронная теория, четко отмежевывающаяся от основной фарадее-максвелловской установки, оказывается вследствие этого бессильною объяснить самый простой и принципиально самый важный случай электрического тока, именно случай тока в сверхпроводящей цепи. Так или иначе, но наши основные физические воззрения должны быть достаточно тщательно проанализированы в отношении их вероятного приближения к сущности явлений природы. Блуждание физической мысли в принципиальном вопросе, касающемся общей обстановки всякого взаимодействия, совершенно не соответствует задачам пауки.

Второй мотив настоящего моего выступления состоит в следующем. Работая в области физических основ электротехники, являющейся не чем иным, как одним из отделов прикладной физики, я особенно остро ощущаю разрыв между принципиальными установками современной физики и теми физическими представлениями, которыми оперирует электротехника. Я имею, в виду, главным образом, созданное трудами Фарадея и Максвелла учение о магнитном потоке и его физических свойствах. С точки зрения современной физики, культивирующей представление о действии на расстоянии, магнитный

[1] См. настоящий сборник, статья II.поток есть чистая фикция, между тем как внимательное рассмотрение процессов, с которыми имеет дело электромеханика, убеждает нас в справедливости общих фарадее-максвелловских взглядов и заставляет нас трактовать магнитный поток в качестве объективной реальности. Я полагаю, что подобное разногласие между практикой и теорией должно быть подвергнуто критическому рассмотрению и изжито. По существу, его не должно быть. Устранение его не только может быть полезно как для практики, так и для теории, но и безусловно необходимо.

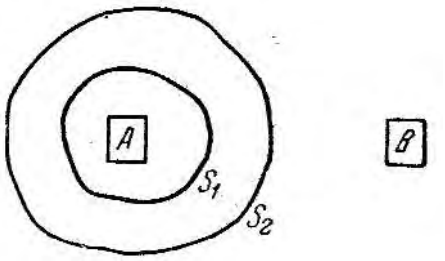
3. Было бы в высокой степени ошибочно усматривать в качестве мотива моей борьбы в защиту фарадее-максвелловской принципиальной установки и против точки зрения «физического» действия на расстоянии какое-либо стремление вернуть науку вспять к эпохе Фарадея.

Когда мы идем в направлении некоторой определенной цели и при этом вместо того, чтобы продвигаться по открывающемуся перед нами кратчайшему пути, как-либо сбиваемся с данного правильного пути и попадаем на извилистые окольные дороги, есть полное основание обратить на это внимание. Хотя бы даже окольные дороги и позволяли нам, несмотря на ряд встречающихся

тупиков, в общем приближаться к цели, рационально как можно скорее вернуться на правильный путь. Для этого, вообще говоря, нет никакой надобности обязательно возвращаться вспять к исходной точке. Достаточно только постараться просто перейти на правильный путь. В таком случае мы сохраним полностью все преимущества достигнутого уже приближения к цели и более уверенно пойдем дальше вперед.

, Точно так же дело обстоит и в отношении пропагандируемого мною возвращения на путь, указываемый нам основными установками Фарадея и Максвелла. Для этого вовсе не требуется забыть все, что дала физическая наука за последние десятилетия, и вернуться к какой-либо стадии наших знаний, соответствующей пережитым уже эпохам. Мы можем и, по моему мнению, должны, сохраняя все преимущества современного приближения к конечной цели возможно большему познанию природы, осветить научные достижения наших дней с точки зрения Фарадея и Максвелла, Это даст только новую пищу физической мысли, откроет новые горизонты и позволит еще более быстрым темпом и более уверенно двигаться дальше в направлении стоящей перед нами цели.

4. Я стремился в своей речи возможно отчетливее вскрыть физическую непримиримость точек зрения фарадее-максвелловской и действия на расстоянии. С этой целью я сформулировал вопрос, который в наиболее общем виде сводится к следующему. Представим себе две взаимодействующие системы A и B (фиг. 3), расположенные на каком угодно расстоянии одна от другой (сколь угодно малом или сколь угодно большом). Это могут быть две материальные массы, тяготеющие одна к другой, два электрические заряда, два магнита или электромагнита, две какие-либо электрические цепи, по которым протекают токи, и т. п. Допустим далее, что система A окружена со



Фиг. 3.

всех сторон двумя замкнутыми поверхностями S_1 и S_2, нигде не касающимися между собою и не пересекающимися. Спрашивается:

Могут ли системы A и B взаимодействовать одна с другою так, чтобы при этом в слое, ограниченном поверхностями S_1 и S_2, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

5. Я полагаю, что всякий исследователь, стремящийся вникнуть в сущность физических явлений, и может, и должен дать на этот вопрос вполне определенный ответ: «да» или «нет». Совершенно невозможно допустить мыслимость некоторого третьего ответа. Не может быть также и речи о каком-либо синтезе этих принципиально противоположных и исключающих друг друга ответов «да» и «нет», так как нельзя представить себе построение такой физической теории, согласно которой в слое между поверхностями S_1 и S_2 в одно и то же время и происходил бы некоторый физический процесс, и решительно ничего не происходило бы. Опыт, к сожалению, показывает, что обычно довольно затруднительно получить со стороны лиц, привыкших к современным физическим представлениям, определенней ответ на поставленный мною вопрос. Чрезвычайно редко можно услышать ответ «нет». В огромном большинстве случаев никакого определенного ответа не дается, а вместо этого иногда делаются попытки возражать против правильности и законности постановки сформулированного мною вопроса. Однако, возражения этого рода не трудно опровергнуть.

Действительно, как бы мы ни смотрели на сущность происходящих в природе процессов, все мы принимаем за нечто безусловно достоверное тот факт, что системы A и B могут как-то физически взаимодействовать. Нельзя, далее, представить себе какие-либо доводы против утверждения, что в слое, ограниченном поверхностями S_1 и S_2 (фиг. 3), либо может, вообще говоря, происходить какой бы то ни было физический процесс, либо он может совершенно отсутствовать. Что-либо третье,

кроме этих двух возможностей, не мыслимо, как я уже указывал выше. В связи с этим мы имеем полное право сопоставлять факт взаимодействия систем *A* и *B c* вероятностью наличия или с вероятностью отсутствия какого бы то ни было физического процесса в слое между поверхностями S_1 и S_2 и иметь по этому поводу суждение. Таким образом сформулированный мною вопрос, побуждающий нас взвесить вероятность того или другого, необходимо признать вполне допустимым, правильным и законным.

Речь могла бы идти только о том, что желательно, быть может, изыскать пример, более выпукло иллюстрирующий антагонизм между двумя рассматриваемыми принципиальными точками зрения, чем это

41

сделал я, Feci quod potui, faciant meliora potentes. Если это кому-либо удастся, могу только приветствовать.

6. С фарадее-максвелловской точки зрения, которая представляется мне единственно приемлемой, на сформулированный мною вопрос необходимо ответить «нет».

Ответ «да» логически вытекает из точки зрения действия на расстоянии, которой придерживается физика наших дней.

Всякое уклонение от прямого ответа на поставленный мною вопрос, всякие оговорки или имеющие характер таковых оговорок рассуждения клонятся обычно к оправданию ответа «да».

7. Обращаясь к внутреннему содержанию ответов «нет» и «да» на мой вопрос, необходимо, прежде всего, иметь в виду, что свойства, обнаруживаемый в каком бы то ни было физическом явлении, мыслимы только в непосредственной связи с каким-то носителем этих свойств, т.-е. в связи с некоторою объективною реальностью, которую можно назвать физическою реальностью. Далее, всякая физическая реальность или сколь угодно малая часть ее обязательно занимает соответствующий ей объем нашего трехмерного пространства. [1] Наконец, мы никак не можем представить себе пространственной разобщенности самой физической реальности и ее характерных свойств. Нельзя допустить, чтобы физическая реальность была расположена в одном месте, а ее свойства сами по себе, в оторванном виде, локализировались бы где-либо в другом месте. И то, и другое мы должны мыслить объединенным в одном и том же объеме.

Рассмотрим теперь систему *A*, наличие которой обусловливает возникновение некоторого физического действия на другую систему *B*, расположенную, вообще говоря, где угодно, на каком угодно расстоянии от системы *A*, Конкретно мы можем мыслить, например, о двух электрических зарядах. При отсутствии заряда *A* заряд *B* данного физического действия не испытывает. В связи с этим мы можем утверждать, что в каждой точке пространства вокруг электрического заряда *A* обнаруживаются какие-то физические свойства, именно способность действовать на заряд *B*.

По поводу рассматриваемых свойств могут быть сделаны два предположения.

Предположение первое. Эти характерные свойства возникают в некотором отдельном участке пространства только вследствие появления там заряда *B*.

Предположение второе. Эти свойства, определяемые наличием заряда *A*, как-то были уже распределены во всем окружающем заряд *A* пространстве совершенно независимо от появления заряда *B*, роль которого в таком случае сводится лишь к. обнаружению данных свойств.

Первое предположение представляется в высокой степени неправдоподобным и противоречащим всей совокупности того, что мы знаем

[1] См. упомянутую выше речь—«Основные воззрения современной физики», стр. 19 настоящего сборника.

42

о силовом поле. В этом отношении можно, например, указать на следующее. В любой Точке пространства, окружающего заряд *A*, свойство воздействовать на заряд *B* возникает лишь через некоторый промежуток времени, считая от момента появления заряда *A*, т.-е. с каким-то запозданием. Однако, в случае предварительного установления силового поля заряда *A*, данное свойство поля мгновенно обнаруживается при внесении в него заряда *B*. На основании этого мы

заключаем, что рассматриваемое свойство было приобретено всеми участками пространства, занятого силовым полем, благодаря какому-то подготовительному процессу еще до внесения заряда *B*.

Остается, следовательно, только второе предположение, а именно, что специфические свойства пространства, как-то закономерно ориентированные около центра, в котором расположен заряд *A*, имеют место независимо от наличия заряда *B*. Достойно особого внимания то обстоятельство, что даже современная математическая теория силового поля, по существу, базируется на этом последнем предположении.

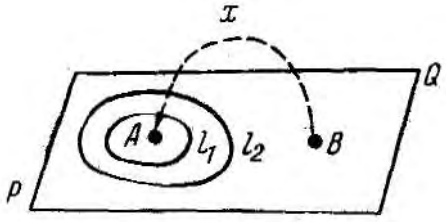
Принимая во внимание сказанное раньше о непосредственной связи свойств с их носителем, необходимо признать, что те или иные характерные свойства данного силового поля присущи какому-то реальному носителю этих свойств, т.-е. физической реальности или, выражаясь обычным языком, некоторой среде, находящейся в пространстве именно там, где обнаруживается силовое поле, т.-е. везде, где есть это поле.

Таким образом, мы имеем логические обоснования принципиальной фарадее-максвелловской установки, согласно которой все физические взаимодействия совершаются не иначе, как при непременном участии среды, окружающей взаимодействующие центры. Отсюда же совершенно естественно вытекает и ответ «нет» на сформулированный мною вопрос.

Считаю долгом указать, что весь ход мыслей, изложенных выше, целиком позаимствован мною у Фарадея и, по существу, почти ничего нового я не добавил.[1]

8. Противоположная точка зрения, признающая возможность «физического» действия на расстоянии и в связи с этим приводящая к ответу «да» на мой вопрос, отвергает все вышеприведенные обоснования фарадее-максвелловской установки и допускает реальное существование абсолютно пустого пространства, решительно ничем незаполненного. Последнее допущение является главным моментом во всех рассуждениях с точки зрения действия на расстоянии, тогда как идея о пространстве абсолютно пустом, самом по себе, без заполняющей его какой-либо материи, в самом широком смысле этого слова, есть лишь один из примеров математической абстракции и не имеет, по моему мнению, прямого отношения к реальному миру физических явлений. Об этом я уже говорил в своей речи. Итак, первый,

[1] См., например, Faraday, Experimental Researches in Electricity, vol. III, p. 571, 572.



Фиг. 4.

основной упрек по адресу точки зрения действия на расстоянии состоит в том, что она вводит в круг физического мышления чистую фикцию — абсолютно пустое пространство.

Допустим, однако, на время, что абсолютно пустое пространство может реально существовать и что оно разделяет две взаимодействующие системы *A* и *B* (фиг. 3), занимая весь объем слоя между поверхностями S_1 и S_2. Ясно, что в таком случае данный слой не содержит в себе никакой физической реальности, и поэтому мы должны считать его совершенно непроницаемым для какого бы то ни было физического процесса, способного осуществлять связь между взаимодействующими системами *A* и *B* в пределах нашего трехмерного пространства. Иными словами, при данных условиях мы не можем мыслить какой-либо проходящей через этот слой линии физической связи между системами *A* и *B*. Если системы все же взаимодействуют, т.-е. если между ними все-таки существует некоторая связь, то очевидно, что она должна осуществляться как-то помимо замкнутого слоя,

ограниченного поверхностями S_1 и S_2. Но это значит, что линия связи между A и B выходит из пределов трехмерного пространства и пролегает где-то в пространстве с большим, чем три, числом измерений, например, в четырехмерном пространстве.

Для пояснения сказанного я воспользуюсь аналогией, прибегнув к пространствам с пониженным числом измерений. Рассмотрим какое-нибудь двухмерное пространство, скажем, поверхность PQ (фиг. 4). Пусть точки A и B символизируют наши взаимодействующие системы. Окружим, далее, точку A двумя замкнутыми кривыми l_1 и l_2, лежащими на поверхности PQ, нигде не касающимися одна другой и не пересекающимися. В таком случае, всякая линия геометрической связи между точками A и B, лежащая в пределах двухмерного пространства PQ, обязательно должна пройти через зону, ограниченную линиями l_1 и l_2. Но если эта зона запрещена для геометрической связи между точками A и B, то искомая связь может быть осуществлена только помимо запрещенной зоны, а именно при помощи какой-либо линии x, соединяющей точкой A и B вне рассматриваемого двухмерного пространства PQ, т.-е. через трехмерное пространство, как это показано на фиг. 4 пунктирной линией.

Совершенно аналогичным образом и в случае взаимодействия систем A и B (фиг. 3), если слой между поверхностями S_1 и S_2 запрещен для какой-либо физической связи данных систем, а эту физическую связь мы всегда ассоциируем с линией геометрической связи между ними, — то эту последнюю мы вынуждены искать за пределами нашего трехмерного пространства, именно в четырехмерном пространстве.

44

Защитники точки зрения действия на расстоянии могут, конечно, мне указать, что связь физического взаимодействия систем A и B не нужно обязательно ассоциировать с какой-либо линией геометрической связи между ними и что вовсе не нужно так примитивно рассуждать. На это я возражу следующим образом. Какая бы то ни было связь между системами A и B не может иметь места в условиях абсолютной изолированности этих систем. Благодаря наличию запрещенного слоя между поверхностями S_1 и S_2, который совершенно разделяет наше трехмерное пространство на две разобщенные части, системы A и B оказываются принадлежащими к двум абсолютно изолированным одна от другой областям трехмерного пространства. Для того, чтобы эти системы все же могли быть связаны взаимодействием, они так или иначе должны быть объединены в одной и той же пространственной непрерывности. Формально можно допустить, что две отдельные трехмерные пространственные непрерывности охватываются одною общей четырехмерной пространственной непрерывностью, т. с. четырехмерным пространством. Это именно и констатируется возможностью построения линии геометрической связи между системами A и B сквозь незапрещенное четырехмерное пространство.

9. До настоящего времени физика не занималась явлениями, происходящими в четырехмерном пространстве, вне нашего трехмерного пространства. Все это увело бы нас в совершенно чуждую область. Герц, за которым нельзя не признать глубокого проникновения в сущность явлений природы, в своей гейдельбергской речи на тему «О соотношениях между светом и электричеством», касаясь попыток физического объяснения электрических явлений при помощи действия на расстоянии, указал, что таким путем мы привносим в науку элементы чего-то, имеющего спиритический характер.

Действительно, как известно, многие теоретики спиритизма и между ними некоторые выдающиеся ученые, привыкшие верить в существование спиритических явлений и пытавшиеся научно обосновать свое отношение к ним, обычно базировали свои суждения именно на допущении физической связи между явлениями, протекающими в нашем трехмерном пространстве и в охватывающем его четырехмерном пространстве. Однако, самая реальность спиритических явлений представляется более чем сомнительной. Об этом, между прочим, с полною достоверностью свидетельствуют результаты работ ряда специальных комиссий Лондонского общества для психических исследований, а также многочисленные труды одного из наиболее деятельных и объективных членов этого общества Франка Подмора. Совершенно несомненно, что спиритические явления вполне

объясняются сознательным, а иногда даже подсознательным, введением участников сеансов в заблуждение, и все это обычно в высокой степени осложняется наличием массового гипноза или самогипноза. Одним словом, четырехмерное пространство тут совсем не при чем. Дело обстоит гораздо проще, и нет решительно никаких оснований привлекать к ответственности четырехмерное пространство.

45

Тем меньше оснований прибегать к четырехмерному пространству в случае рассмотрения вопроса о природе физических явлений.

10. Сказанное выше нисколько не противоречит закономерности и целесообразности использования идеи о многомерных пространствах в процессе математических операций, к которым иногда весьма полезно и даже необходимо прибегать в некоторых специальных отделах современной теоретической физики. В области высшего анализа не может быть никаких ограничений для формально правильного развития математических представлений. Но в области нашего физического мышления, в особенности при рассмотрении вопроса о вероятной природе физических явлений, несомненно приходится считаться с некоторыми ограничениями, вытекающими из наших общих принципиальных установок, и не выходить за пределы нашей нормальной пространственно-временной непрерывности, в которой эти явления имеют место.

11. Некоторые защитники точки зрения «физического» действия на расстоянии утверждают, что возражения против этого воззрения проистекают, главным образом, вследствие неспособности отдельных лиц, занимающихся вопросами физики, подняться несколько выше элементарных представлений, между тем как все дело в привычке. Указывается, что нам остается лишь преклониться перед фактом действия на расстоянии и, просто-напросто, к этому факту привыкнуть. Тот, кто к этому факту привык, будто бы не испытывает ни малейшего затруднения от того, что с этим фактом ему приходится оперировать. [1]

Я совершенно согласен с тем, что ко многому можно привыкнуть, в особенности, добавляю от себя, если при этом мы не контролируем образующихся привычек и к тому же не сопротивляемся влиянию самогипноза или массового гипноза, наличие которого во многих случаях можно констатировать. Не чем иным, а именно слепым подчинением привычному методу мышления, в значительной степени объясняется и необычайная в свое время стойкость некоторых отживших уже научных теорий и воззрений. Напомним хотя бы о птоломеевой системе мира, о невесомых жидкостях, о теории флогистона. Замечательно при этом, что несмотря на несомненную ошибочность некоторых научных воззрений старого времени они иногда позволяли все же неуклонно идти вперед по пути прогресса. Например, Сади Карно, считая теплоту за неразрушимый агент, что, как мы знаем теперь, не соответствует действительности, пришел к верному результату при рассмотрении вопроса о совершении работы паровой машиной. И в наше время, конечно, вполне возможны аналогичные случаи. Но это не мотив для защиты некоторых привычных научных представлений, в частности, представления о «физическом» действии на расстоянии.

Во всяком случае, я не отрицаю весьма важного значения привычек в нашем научном мышлении, но ставлю вопрос, не представляет-

---

[1] См., например, стенограмму третьей беседы о природе электрического тока, выступление Я. И. Френкеля. «Электричество», 1930 № 10 стр. 428

46

ся ли целесообразным внимательно проанализировать их и начать совместную борьбу против нерациональных привычек.

12. Итак, на основании всего изложенного выше, я утверждаю, что господствующее теперь в науке привычное представление о действии на расстоянии, являясь по существу лишь математической абстракцией, иногда полезной и ценной, не должно быть объективируемо в качестве первичного физического явления, т.-е. не должно трактоваться в качестве «физического» действия на расстоянии, так как это никоим образом не может соответствовать тому, что происходит и действительности.

Несмотря на, казалось бы, полную очевидность псевдофизического характера идеи о действии на расстоянии, она продолжает играть роль привычного основного фона современной физической мысли и накладывает на нее своеобразный отпечаток.

Все мои принципиальные физические установки прямо или косвенно, явно или неявно вытекают из категорического отрицания допустимости «физического» действия на расстоянии. Должен признаться, однако, что в этом отношении у меня пока имеются, к сожалению, более или менее серьезные расхождения со многими моими коллегами по Академии Наук, в том числе, например, с академиками А. Ф. Иоффе, С. И. Вавиловым, с членами-корреспондентами Академии — Я. Н. Шпильрейном, Я. И. Френкелем, И. Е. Таммом и Г. А. Гамовым. Степень указанного расхождения варьирует в очень широких пределах, от некоторого лишь различия в четкости основных установок до полной противоположности.

Едва ли мыслимы какие-либо возражения против того, что необходимо, наконец, подвергнуть тщательному обсуждению важнейший Принципиальный вопрос о возможности «физического» действия на расстоянии. Я совершенно уверен, что наша совместная работа в Академии Наук представляет для этого все возможности и, в частности, страницы «Известий» Академии открыты каждому из нас для изложения своего суждения по данному поводу. Путем обмена мнений мы придем, конечно, к объединяющим нас основным установкам. Мои попытки вызвать в стенах АН обмен мнений по этому вопросу были до сих пор безрезультатны.

13. В заключение можно следующими положениями резюмировать все мои мысли касательно допустимости «физического» действия на расстоянии:

а) В современной теоретической физике представление о действии на расстоянии играет доминирующую роль без достаточных к тому оснований.

б) Действие на расстоянии не может быть рассматриваемо в качестве первичного явления, т.-е. в качестве «физического» действия на расстоянии.

в) Принципиальная фарадее-максвелловская установка, выдвигающая на первый план непременное участие среды во всех физических взаимодействиях, совершенно несовместима с точкой зрения «физического» действия на расстоянии.

47г) Ввиду своего исевдо-физического характера, представление о действии на расстоянии может быть допускаемо только при формально-математическом описании физических явлений, а также при анализе физических закономерностей.

д) Настоятельно необходим критический пересмотр основных установок современной физики, прямо или косвенно вытекающих из представлений о «физическом» действии на расстоянии. [1]

---

[1] См. выдержки из дискуссии по этому докладу. Часть II настоящего сборника, статья XVIII.

IV

О НЕКОТОРЫХ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ОБЛАСТИ ФИЗИКИ [1]

В своих предыдущих докладах — «Основные воззрения современной физики» и «О «физическом» действии на расстоянии» [2] — я сделал попытку подвергнуть анализу, с самой общей точки зрения, содержание главнейших физических представлений и, в частности, особо остановился на условиях, необходимых для осуществления какого бы то ни было физического взаимодействия. Само собой разумеется, что ввиду чрезвычайной обширности затронутой мною темы не могло быть и речи о том, чтобы достаточно обстоятельно, явным образом, охватить все, что имеет для современной физики, несомненно, актуальное значение. В связи с этим, в настоящем докладе я предполагаю несколько развить и дополнить сказанное мною раньше, сосредоточив внимание на ряде положений, внутренне объединенных между собою и представляющихся мне первоочередными.

Учитывая наличие серьезных разногласий касательно многих основных положений, относящихся к области физики, а также возникающие на этой почве недоразумения и поводы для взаимного непонимания, я стремлюсь надлежащей, более или менее отчетливой формулировкой, по крайней мере, некоторых принципиальных установок, наметить такой путь логических умозаключений, который в общем, был бы приемлем в качестве соответствующего вероятной природе вещей.

Выдвигаемые мною положения представлены в виде серии вопросов, соподчиненных до известной степени и построенных, как мне кажется, таким образом, что на них можно ответить только «да» или «нет», при исключенном третьем. Содержание каждого из вопросов, в совокупности с ответом «нет», следует рассматривать как вполне определенное положение. В случае ответа «да», хотя бы на один из вопросов. Некоторые из них теряют всякий смысл. Впереди идут вопросы, которые могут показаться очень примитивными и просто самоочевидными, по я полагаю, однако, что они весьма полезны и даже необходимы и качестве вводных, наводящих вопро-

[1] Доложено в Общем собрании Академии Наук СССР 28 апреля 1934 г.
[2] См. настоящий сборник, статьи II и III.

сов. С чисто формальной точки зрения, два первых вопроса не имеют решительно никакого отношения к области физики. Итак, переходим к вопросам:

Вопрос 1. Можно ли разложить специфические качества художественного изваяния (например, какого-либо произведения Микеланджело) на элементарные свойства частиц мрамора, из которого это изваяние выполнено?

Вопрос 2. Правдоподобно ли предположение, что специфические качества какого-либо сложного механизма (например, точных астрономических часов или аэроплана), принадлежащие ему как некоторому целому, могут быть сведены к простой сумме элементарных свойств отдельных механических деталей, из которых состоит данный сложный механизм?

Вопрос 3. Соответствует ли вероятной природе вещей предположение, что какая-либо простейшая совокупность, состоящая из двух входящих в нее физических реальностей [1] (например, комбинация протона и электрона, являющаяся атомом водорода, или комбинация атома водорода и атома хлора, образующая молекулу соляной кислоты и т. п., или же, наконец, совокупность любых двух объектов одного и того же рода, вообще), обладает только такими качественными характеристиками, которые могут быть рассматриваемы как простая сумма элементарных свойств отдельных слагаемых?

Вопрос 4. Соответствует ли вероятной природе вещей предположение, что какая бы то ни было совокупность, состоящая из произвольного количества входящий в нее дискретных физических реальностей, обладает только такими качественными характеристиками, которые могут быть рассматриваемы как простая сумма некоторых свойств отдельных слагаемых?

Вопрос 5. Можно ли утверждать, что существует такой физический процесс, иными словами, такое движение в общефилософском смысле слова (применительно к области физических явлений), в состав которого не включается какое бы то ни было механическое движение, понимаемое как пространственное перемещение некоторой физической реальности, соответствующей рассматриваемому процессу, или ее частей?

Вопрос 6. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо физический процесс (например, электромагнитное поле или тепловой процесс и т. п.) обладает, как целое, только такими качественными характеристиками, которые могут быть сведены к простой сумме некоторых свойств, принадлежащих элементарным механическим движениям (см. вопрос 5), имманентно связанным

[1] Физическою реальностью называется объективная реальность, которая участвует в некотором физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении. См. настоящий сборник, статья II.

с данным физическим процессом, т.-е. обязательно заключающимся в нем?

Вопрос 7. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо сложный физический процесс обладает, как целое, только такими качественными характеристиками, которые

могут быть сведены к простой сумме специфических свойств дискретных физических процессов, входящих в состав данного сложного процесса?

Вопрос 8. Правдоподобно ли предположение, что в некотором физическом процессе, как таковом, могут иметь место какие бы то ни было изменения количественного или качественного характера при полном отсутствии соответствующих изменений в элементарных механических движениях, имманентно связанных с данным физическим процессом?

Вопрос 9. Могут ли какие-либо два физических процесса взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом не имело места также и какое бы то ни было соответствующее взаимодействие между теми элементарными механическими движениями, которые имманентно связаны с каждым из данных физических процессов в отдельности?

Вопрос 10. Может ли наше заключение по предыдущему вопросу 9-му измениться в связи с тем, что вместо двух мы рассматриваем сколь угодно большое число дискретных физических процессов, как-то взаимодействующих между собою?

Вопрос 11. Могут ли случайность и необходимость в области физических процессов, вообще, трактоваться совершенно независимо от случайности и необходимости в отношении тех элементарных механических движений, которые имманентно связаны со всеми без исключения физическими процессами?

Вопрос 12. Могут ли случайность и необходимость в области физических процессов трактоваться вне всякой связи с механическим принципом причинности?

Вопрос 13. Можно ли, признавая механический принцип причинности и единство мира, допустить в области физических процессов существование таких причинных связей, которые были бы абсолютно независимы друг от друга?

Вопрос 14. Можно *ли*, признавая механический принцип причинности, допустить в области физических процессов объективную реальность абсолютной случайности, понимаемой как событие, абсолютно не подчиненное какой бы то ни было причинной связи с другими событиями, среди которых оно возникает?

Вопрос 15. Есть ли основание принципиально отрицать, что в области физических процессов, кроме прямой необходимости, может иметь место только относительная случайность, понимаемая как событие, неизбежно возникающее в результате соответственного Комплекса причинных связей (причем это событие происходит всякий раз, когда указанный комплекс удовлетворяет надлежащим пространственно-временным условиям)?

51

Вопрос 16. Можно ли отрицать, что различные группы относительных случайностей в области физических процессов характеризуются свойственными им закономерностями и соответствующими специфическими качествами?

Вопрос 17. Можно ли, вообще, отрицать объективную реальность относительной случайности в области физических процессов?

Совокупность ответов «нет» на все 17 вопросов обязывает нас принять вполне конкретную схему основных наложений, в общем, по моему мнению, соответствующих тому, что действительно происходит в области физических явлений. Ясно, конечно, что некоторые из этих положений, по существу, выходят далеко за пределы физики, как таковой, имеют прямое отношение ко всем сторонам мироздания в целом (включая явления биологические, психические, социальные и т. д.) и вместе с тем предрешают ряд дальнейших выводов.

В заключение я считаю необходимым высказать предположение, что многие болезненные блуждания современной физической мысли (а, быть может, это относится и не только к физической мысли) должны сами собой устраниться в случае, если бы было признано наиболее правильным на все сформулированные мною вопросы ответить безоговорочным «нет».

V

О МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ ЗРЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ [1]

1. Грандиозные успехи современной физики настолько отвлекли внимание исследователей природы от некоторых совершенно здравых и непреложных утверждений старой, классической физики, что теперь считается чем-то весьма предосудительным говорить, например, о каких-либо механических движениях, сопровождающих то или иное физическое явление (электромагнитное поле, магнитный поток, дифракция электронов в связи с их волновой природой и т. п.). Нередко при этом рассмотрение подобных механических движений квалифицируется как приверженность к механистической точке зрения. На этой почве возникло и продолжает возникать немало недоразумений, являющихся серьезным препятствием к правильной постановке вопроса о возможно более глубоком понимании природы физических явлений. Данная статья представляет собою попытку хотя бы частично проанализировать и несколько разъяснить ряд недоразумений такого рода.

2. Так как в настоящее время самый термин механическое движение» может казаться не вполне безупречным, в особенности при рассмотрении микрофизических явлений, то я во избежание в дальнейшем каких-либо недомолвок и неясностей считаю необходимым указать, какое именно содержание я вкладываю в этот термин. Стремясь дать возможно более общее определение, под механическим движением я буду понимать пространственное перемещение некоторой физической реальности, соответствующей рассматриваемому процессу, или частей этой физической реальности. Под физическою же реальностью я разумею такую объективную, т.-е. существующую вне нашего сознания, реальность, которая участвует в некотором физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении. При этом, каковы бы ни были наши представления о пространстве, в котором протекают во времени различные физические процессы, будет ли это пространство Евклида, или пространство Лобачевского, или пространство Эйнштейна, или же, наконец, любое иное пространство, всякая физическая реальность, в целом или

[1] Статья, написанная для сборника «Фридриху Энгельсу АН СССР».

сколь угодно малая ее часть обязательно занимает некоторый объем нашего трехмерного пространства. Наука о природе не знает физических реальностей, не занимающих никакого объема. Всякая попытка строить представление о физической реальности, отвлекаясь от обязательности ее объемной характеристики, должна быть рассматриваема как яркий пример ошибочного объективирования математических абстракций. [1]

3. В своем докладе «О некоторых основных положениях, относящихся к области физики», сделанном в Общем собрании АН СССР 28 апреля 1934 года,[2] я сформулировал ряд общих положений в виде вопросов, на которые со своей стороны я отвечаю категорическим «нет». Некоторые из этих вопросов (именно 5—9) непосредственно касаются темы настоящей статьи. Считаю поэтому целесообразным остановиться на их содержании.

Вопрос 5. Можно ли утверждать, что существует такой физический процесс, иными словами, такое движение в общефилософском смысле слова (применительно к области физических явлений), в состав которого не включается какое бы то ни было механическое движение, понимаемое как пространственное перемещение некоторой физической реальности, соответствующей рассматриваемому процессу, или ее частей?

В совокупности с ответом «нет» этот вопрос, подобно некоторым последующим вопросам, является в сущности лишь одним из тезисов диалектического материализма. Действительно, у Энгельса мы встречаем, между прочим, нижеследующие совершенно определенные суждения о связи всякого движения (т.-е. в области физики—всякого явления или процесса) с механическим движением:

«Всякое движение заключает в себе механическое движение и перемещение больших или мельчайших частей материи; познать эти механические движения является первой задачей науки, однако лишь первой. Само же это механическое движение вовсе не исчерпывает движения вообще».[3]

«Всякое движение связано с каким-нибудь перемещением — перемещением небесных тел, земных масс, молекул, атомов или частиц эфира. Чем выше форма движения, тем мельче это перемещение. Оно нисколько не исчерпывает природы соответствующего движения, но оно неотделимо от него. Поэтому его приходится исследовать раньше всего остального».[4]

Казалось бы, ответ «нет» на мой вопрос пятый является совершенно обязательным для всякого физика, стремящегося углубленно рассматривать природу вещей, и должен составлять один из главных элементов нормального фона физического мышления. Однако в действительности обычно наблюдается обратное. В огромном большинстве случаев современный физик склоняется к ответу «да»

---

[1] См. настоящий сборник, статья II.

[2] См. настоящий сборник, статья IV.

[3] Энгельс. «Диалектика природы», изд. 6-е, 1932, стр. 80.

[4] Там же, стр. 130.

и допускает, таким образом, что существуют физические процессы, не сопровождаемые теми или иными механическими движениями, т.-е. пространственными перемещениями. Например, в случае стационарного магнитного поля, связанного с постоянным магнитом, магнитный поток, пронизывающий некоторый объем пространства между полюсами магнита, может, якобы, существовать без каких бы то ни было пространственных перемещений соответствующей физической реальности в этом самом объеме. Можно, конечно, пытаться защищать точку зрения, согласно которой магнитное поле и, вообще, электромагнитное поле не являются реальными физическими процессами, а представляют собою лишь продукт нашего воображения, вводимый нами только для удобства и наглядности, но абсурдность подобного предположения была мною достаточно подробно выяснена в ряде выступлений и докладов, [1] и потому я на этом не буду здесь останавливаться.

4. Перехожу теперь к следующим моим вопросам.

Вопрос 6. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо физический процесс (например, электромагнитное поле или тепловой процесс и т. п.) обладает, как целое, только такими качественными характеристиками, которые могут быть сведены к простой сумме некоторых свойств, принадлежащих элементарным механическим движениям (см. вопрос 5), имманентно связанным с данным физическим процессом, т.-е. обязательно заключающимся в нем?

Вопрос 7. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо сложный физический процесс обладает, как целое, только такими качественными характеристиками, которые могут быть сведены к простой сумме специфических свойств дискретных физических процессов, входящих в состав данного сложного процесса?

Вопросы шестой и седьмой самым непосредственным образом касаются сущности механистической точки зрения в физике. В совокупности с четкими ответами «нет» эти вопросы представляют собою, как было выше уже указано, вполне определенные тезисы диалектического материализма, признание которых заставляет исследователя того или иного физического процесса не считать завершенной задачу изучения этого процесса, когда ему удается выяснить, какие именно элементарные физические процессы, в пределе, какие именно пространственные перемещения (механические движения) имманентно входят в состав данного сложного процесса. Это есть первый этап изучения и только лишь первый. Остается еще большая работа по изучению специфических особенностей, новых качественных характеристик обследуемой совокупности, воспринимаемой нами как некоторый физический процесс, как некоторое физическое явление своего рода.

«Но если я не имею ничего другого сказать о теплоте, кроме

---

[1] См. настоящий сборник, статьи II и III.

того, что она представляет собою известное перемещение молекул, то лучше мне замолчать», — говорит Энгельс. [1]

Ответы «да» на вопросы шестой и седьмой свидетельствуют именно о том, что исследователь придерживается механистической точки зрения, согласно которой качественные характеристики некоторой физической совокупности не представляют собою чего-либо в большей или меньшей степени нового, специфического для этой совокупности, но могут быть рассматриваемы как простая «механическая» сумма элементарных свойств, присущих отдельным составным частям данной совокупности, в пределе, присущих элементарным пространственным перемещениям (механическим движениям), которые имманентно связаны со всяким физическим процессом. Подобного рода воззрения в такой же степени ошибочны, как если бы мы утверждали, что специфические качества некоторого художественного изваяния (например, какого-либо произведения Микель-Анджело) могут быть разложены на элементарные свойства частиц мрамора, из которого это изваяние выполнено. Точно так же было бы весьма ошибочно утверждение, что специфические свойства, которыми обладают точные астрономические часы или аэроплан, как целое, могут быть рассматриваемы в качестве простой суммы элементарных свойств отдельных механических деталей, входящих в состав данных сложных механизмов.

Таким образом, сущность механистической точки зрения в области физических представлений состоит не в признании обязательного наличия соответствующего механического движения, т.-е. пространственного перемещения, во всяком физическом процессе, во всяком движении (в общефилософском смысле термина «движение»), а в ошибочном предположении, будто бы новые качественные характеристики, которыми всегда обладает любая сложная комбинация каких-либо элементарных составляющих, могут быть разложены на простейшие свойства этих элементарных составляющих, и, в частности, в попытках сведения специфических особенностей всякого физического процесса к свойствам элементарных механических движений. Признание эфира, в котором могут иметь место механические движения, т.-е. пространственные перемещения элементарных объемов этой «первоматерии», непрерывно заполняющей все наше трехмерное физическое пространство, само по себе, еще не является признаком механистической точки зрения, подобно тому, как и оперирование, например, с «идеальной» жидкостью Гельмгольца вовсе не должно быть рассматриваемо как свидетельство об идеалистической установке. Нельзя рассуждать с точки зрения филологических признаков.

5. Остаются еще два сформулированных мною вопроса, могущих до известной степени пролить свет на значение роли механических движений (пространственных перемещений), внутренне присущих физическим процессам всякого рода.

---

[1] Энгельс. «Диалектика природы», изд. 6-е, 1932, стр. 80.

56

Вопрос 8. Правдоподобно ли предположение, что в некотором физическом процессе, как таковом, могут иметь место какие бы то ни было изменения количественного или качественного характера при полном отсутствии соответствующих изменений в элементарных механических движениях, имманентно связанных с данным физическим процессом?

Вопрос 9. Могут ли какие-либо два физических процесса взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом не имело места также и какое бы то ни было соответствующее взаимодействие между теми элементарными механическими движениями, которые имманентно связаны с каждым из данных физических процессов в отдельности?

На первый взгляд может показаться, что ответы «нет» на выше рассмотренные вопросы пятый и шестой не предрешают обязательно отрицательные же ответы и на вопросы восьмой и девятый. В действительности это не так. Некоторое архитектурное сооружение, сложенное из кирпичей, не может претерпеть каких-либо изменений качественного или количественного характера без того, чтобы при этом не имели места и соответствующие изменения, непосредственно касающиеся образующих здание кирпичей, т.-е. касающиеся количества этих кирпичей или их расположения.

Совершенно аналогичным образом дело обстоит и в отношении элементарных механических движений (пространственных перемещений), являющихся теми «кирпичиками», из которых построено «здание» любого физического процесса. Всякое изменение в элементарных механических движениях, имманентно входящих в состав какого-либо физического процесса, обязательно сопровождается и соответствующим изменением количественного или качественного характера в данном физическом процессе, как целом. Должно также иметь место и обратное соотношение. Совершенно невозможно представить себе какие-либо изменения в некотором физическом процессе без того, чтобы при этом обязательно же не происходили и изменения в соответствующих элементарных механических движениях. Далее, какое-либо взаимодействие между двумя физическими процессами, являющимися более или менее сложными комплексами, абсолютно не мыслимо иначе, как результат непосредственного или связанного с промежуточными процессами взаимного воздействия элементарных составляющих этих сложных комплексов. При этом, конечно, необходимо решительно отвергнуть предположение о возможности реальных проявлений таинственного действия на расстоянии (безразлично, мгновенного или запаздывающего).

6. Если, как это выяснено выше, пространственное перемещение содержится в качестве совершенно неотъемлемой части во всяком движении вообще, во всяком физическом процессе, то, следовательно, стремление познать это пространственное перемещение вполне правильно и целесообразно. Желательно по мере возможности составить себе, наконец, вероятную картину механических движений (пространственных перемещений), присущих каждому физическому явле-

57

нию, но надо только помнить, что этим ни в коем случае еще не исчерпывается задача изучения и понимания данного явления со всей его многообразной спецификой. Таким образом, попытки классической физики дать некоторую схему пространственных перемещений, происходящих в электромагнитном поле, не являются сами по себе чем-то, заслуживающим принципиального осуждения. В исторической перспективе их надо рассматривать в качестве совершенно законных, хотя до сих пор и не вполне приведших к цели, попыток сделать то, что, в конце концов, должно быть сделано. Все эти попытки, кажущиеся некоторым безрезультатными, представляют собою, однако, весьма ценный материал для будущих исследователей. В частности, представляется весьма вероятным, что идея Максвелла о магнитном потоке как о совокупности элементарных вихревых нитей в эфире имеет в основном характер чего-то вскрывающего истинную природу магнитного потока и вполне заслуживающего дальнейших изысканий и углублений.

Итак, представление о каких-либо физических процессах вообще (и в частности об электромагнитном поле, о магнитном потоке и т. д.) вне обязательной связи их с соответствующими элементарными пространственными перемещениями — безусловно ошибочно. Все это представляет собою явный признак физического идеализма, который, несомненно, является коренной причиной многих патологических уклонов в современной физической мысли. Указанная ошибочная точка зрения в отношении электромагнитного поля чрезвычайно распространена в настоящее время. С этим связаны обычно и все возражения против представления о мировом эфире, как о первичной физической субстанции, объемные элементы которой могут претерпевать какие-либо пространственные перемещения, т.-е. находиться в состоянии механического движения.

Как известно, идею о «немеханическом» эфире, т.-е. о таком «эфире», к отдельным объемным элементам которого нельзя применять понятие о пространственном перемещении, высказал еще Эйнштейн. Но подобный мистический «эфир» является чем-то, физически бессодержательным, и термин этот, понимаемый в эйнштейновском смысле, представляет собою в действительности не что иное, как лишь своеобразный синоним термина «абсолютная пустота». Конечно, нет никакого физического смысла говорить о пространственных перемещениях объемных элементов «абсолютной пустоты»! Сторонники эйнштейновского «эфира», таким образом, отрываются от физической действительности и уклоняются в сторону физического идеализма. «Мир есть движущаяся материя, Ответим мы, и законы движения этой материи отражает механика по отношению к медленным

движениям, электромагнетическая теория — по отношению к движениям быстрым» — так сказал Ленин, [1] немногими словами выразивший то, что является сущностью содержания настоящей статьи.

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр.230, «Материализм и эмпириокритицизм».

58

7. Достойно особого внимания, что все главнейшие успехи современной физики по существу тесно связаны с проникновением в характер тех пространственных перемещений, тех движений соответствующих физических реальностей, которые имеют место в различных процессах или в различных физических комплексах, воспринимавшихся ранее как нечто неделимое и самодовлеющее.

Так, например, атом обычной материи предстал теперь перед взором исследователя как целый микрокосмос, как обособленный микроскопический мир, части которого находятся в непрерывном движении. Эти составные части (электроны, протоны и т. д.), казавшиеся не так еще давно какими-то предельными физическими реальностями, в настоящее время, благодаря открытию дифракции материальных лучей и успехам квантовой волновой механики, рисуются в качестве специфических комплексов, имеющих волновую природу. Правда, методы формально-математического описания соответствующих волновых процессов основаны на использовании таких представлений (фазовые волны в многомерных пространствах сколько угодно большого числа измерений), которые не, поддаются простой физической интерпретации и должны быть понимаемы лишь как чисто условное вспомогательное орудие, вполне законное при математическом анализе, но не при рассмотрении истинной природы явлений. Только весьма распространенной привычкой к ошибочному объективированию математических абстракций [1] можно объяснить то обстоятельство, что некоторые противники материалистической трактовки физических явлений утверждают, будто бы реальной причиной, обусловливающей дифракцию, например, электронов, являются фазовые волны, распространяющиеся в многомерных пространствах. Ясно, конечно, что подлинно реальной причиной дифракции электронов могут быть только волновые процессы, происходящие именно в физическом трехмерном пространстве и имеющие непосредственное отношение к природе электронов. Совершенно очевидно также, что реальные волновые процессы, связанные с электронами, не следует примитивно понимать как упругие колебания объемных элементов эфира, по примеру справедливо отброшенных теперь представлений классической оптики, но необходимо рассматривать эти волновые процессы как имеющее периодический характер специфическое движение сложной формы, в состав которого, в конце концов, должны входить и элементарные пространственные перемещения. Быть может, мы имеем в данном случае дело с каким-то: вихревым движением, В настоящее время в этом отношении можно строить лишь догадки.

8. В заключение настоящей статьи я считаю долгом указать, что необходимо, наконец, вполне определенно реабилитировать «механическое движение», надлежащим образом модернизировав, конечно, содержание этого термина, и раскрепостить физическую мысль, признав за ней законное право оперировать пространственными

[1] См. настоящий сборник, статья II.

59

перемещениями соответствующих физических реальностей во всех случаях, когда мы стремимся познать конечную структуру того или иного физического процесса. Необходимо вместе с тем четко признать, что борьба с ошибочной научно-философской установкой, которая именуется механистической точкой зрения, не должна быть подменяема в современной физике совершенно необоснованным гонением на законные попытки рассмотрения тех механических движений, тех пространственных перемещений, которые, несомненно, составляют основу структуры всякого физического процесса, хотя никоим образом сами по себе не исчерпывают его сущности. Следует, наконец, перестать отождествлять термины «механический» и «механистический», [1] как это, к сожалению, нередко имеет место в современной научно-философской и физической литературе.

VI
О СОВРЕМЕННОЙ БОРЬБЕ МАТЕРИАЛИЗМА С ИДЕАЛИЗМОМ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ [1]

1. «Суть кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. с. в замене материализма идеализмом и агностицизмом». [2] Так сказал В. И. Ленин еще тридцать лет тому назад по поводу некоторых течений в физической науке, возникших в связи с бурным потоком открытий, которые, на первый взгляд, якобы требовали отказа от основных представлений принципиального характера. Своим глубоким анализом неправильных уклонов в трактовке физических явлений В. И. Ленин показал, что в действительности нет никаких поводов к тому, чтобы отходить от позиций материалистического миропонимания, и что, наоборот, каждое новое открытие, обогащающее физическую науку, только подтверждает установки диалектического материализма, знаменуя при этом новую ступень в непрерывной и совершенно закономерной эволюции наших физических воззрений.

Как всем хорошо известно, кризис в физике еще не изжит. Именно теперь, когда физическая мысль устремилась в область явлений атомного масштаба, когда наука обогатилась целым рядом новых фактов, касающихся строения вещества, и теоретическая физика сделала много чрезвычайно важных обобщений, — именно теперь кризис в физике приобрел особую остроту. Суть дела и в настоящее время заключается в том, что основные положения материализма, в целом или частично, разделяются не всеми представителями физической науки, как за границей, так и в СССР. В связи с этим необходимо констатировать у некоторых современных физиков более или менее резко выраженные уклоны в сторону идеализма.

2. В зарубежных странах классовая идеология является одним из главных факторов, обусловливающих антиматериалистические течения в области науки о природе. В нашей стране остатки подобных течений в основном связаны с отсутствием надлежащего, критического отношения к высказываниям некоторых зарубежных ведущих

---

[1] Напечатано (в порядке обсуждении) в журнале «Под знаменем марксизма», 1938, № 8, стр. 111—137.

[2] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 211, «Материализм и эмпириокритицизм».

физиков и, подчас, с простым подражанием им. Это не может не тормозить развития физической мысли у нас в Союзе и препятствует ей выйти на самостоятельный путь. Вместе с тем, однако, необходимо отметить, что в ряде случаев у тех советских физиков, которые еще не стали полностью на позиции диалектического материализма, наблюдается определенная тенденция к отмежевыванию от научно-философских течений, антагонирующих с материализмом.

Дальнейшая борьба за искоренение идеалистических установок в области физического мышления может в значительной степени облегчиться и сделаться достаточно плодотворной при условии четкого формулирования некоторых основных положений, с которыми необходимо было бы считаться во всех без исключения случаях. Следующие 10 положений в полной мере соответствуют вероятной природе вещей и должны служить для правильной ориентировки при рассмотрении физических явлений.

Положение I. Предмет физических изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания, так что в действительности происходит не то или иное в соответствии с нашей точкой зрения, а нечто, совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно неподчиненное нашим точкам зрения.

Положение II. Материя есть «объективная реальность, существующая независимо от человеческого сознания и отображаемая им». [1]

Положение III. «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени». [2]

Положение IV. «...Пространство и время —не простые формы явлений, а объективно-реальные формы бытия». [3]

Следствие 1-е. Абсолютно пустое пространство или, иными словами, пространство, лишенное физического содержания, т.-е. не содержащее вечно движущейся материи, есть абстракция.
Следствие 2-е. Абсолютное время, независимое от вечно движущейся материи, есть абстракция.
Положение V. Всякая физическая реальность, т. е, объективная реальность, участвующая в каком-либо физическом явлении, представляет собою некоторую форму движущейся материи.
Положение VI. Всякая физическая реальность характеризуется тем, что любая сколь угодно малая часть ее обладает некоторым объемом и локализована в пространстве и времени.
Положение VII. «Мир есть движущаяся материя... и законы движения этой материи отражает механика по отношению к медленным движениям, электромагнетическая теория — по отношению к движениям быстрым». [4]

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 214.
[2] Там же, стр. 144.
[3] Там же, стр. 144.
[4] Там же, стр. 230.

62

Положение VIII. «Всякое движение заключает в себе механическое движение и перемещение больших или мельчайших частей материи; познать эти механические движения является первой задачей науки, однако лишь первой. Само же это механическое движение вовсе не исчерпывает движения вообще».[1]
Положение IX. В основе рассмотрения физических явлений должно лежать безоговорочное «признание объективной закономерности, причинности, необходимости в природе... наряду с подчеркиванием относительного характера наших, т.-е. человеческих, приблизительных отражений этой закономерности в тех или иных понятиях». [2] Положение X. Во всяком сколь угодно малом или сколь угодно большом объеме полное количество энергии (с учетом энергетического эквивалента массы) может изменяться только в результате движения энергии из данного объема наружу или снаружи внутрь данного объема.
3. Вышеприведенные положения не представляют собою чего-либо нового для тех, кто стремится придерживаться материалистических установок. В отдельных случаях (положения II, III, IV, VII, VIII и IX) формулировки взяты непосредственно в виде цитат из работ В. И. Ленина и Ф. Энгельса, так как эти цитаты исключительно четко и ясно выражают сущность совершенно неоспоримых представлений о природе.
Из всей совокупности опытных данных вполне определенно вытекает, что мы не можем какими бы то ни было усилиями нашего сознания прекратить бытие того «нечто», которое составляет предмет физических изысканий. Констатирование этого принципиально важного обстоятельства есть не что иное, как признание объективной реальности материального мира, существующего вне нашего сознания. Положение I, именно указывающее, что предмет физических изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания, является основной предпосылкой для всего дальнейшего. Признание справедливости этого положения требует самого категорического осуждения таких крайних течений философской мысли, как солипсизм, а также вообще не допускает какого-либо соподчинения объективного субъективному. Как известно, солипсист признает существование только своего собственного сознания. Он делает иногда некоторую уступку в виде признания по аналогии и чужих сознаний. Мир, с точки зрения солипсизма, есть лишь комплекс наших внутренних переживаний. Насколько непоследователен бывает сторонник этих крайних идеалистических взглядов, насколько он сам мало руководствуется ими в своей жизни и деятельности, явствует хотя бы из того, что он, конечно, принимает ежедневно пищу и, если он окажется, например, на железнодорожном пути, по которому мчится навстречу поезд, то сойдет с пути, несмотря на то, что на словах он отрицает существование чего бы то ни было, кроме

[1] Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 249. Партиздат. 1934.

[2] Ленин. Соч., т.XIII, стр. 128.
63
собственного сознания. Правда, он говорит при этом, что лишь отдает дань общечеловеческим предрассудкам. Однако эти «предрассудки», обоснованные опытом многих поколений и свидетельствующие о существовании на свете чего-то, кроме человеческого сознания, постоянно руководят проявлениями чувства самосохранения, которым, несомненно, обладает каждый солипсист. Таким образом, теоретики солипсизма на практике всегда оказываются чистейшими «материалистами» и своим неизбежным подчинением внешним обстоятельствам весьма убедительно доказывают абсурдность того, что им подсказывает неправильно работающее воображение.

В теснейшей внутренней связи с чистым солипсизмом стоит феноменализм всех оттенков, в том числе махизм, до последнего времени имеющий немало сторонников. Феноменализм вынужден допустить связь деятельности нашего сознания с ощущениями, по, вместо того чтобы сделать один шаг вперед и признать, что наши ощущения являются результатом воздействия на наши органы чувств со стороны объективной реальности, находящейся вне нас и лишь отображаемой в нашем сознании через посредство ощущений, — вместо этого феноменализм не идет дальше рассмотрения «комплексов ощущений», которые якобы и исчерпывают собой все содержание того, что мы обычно называем «вещами», «телами». В связи с этим феноменализм утверждает, что предметом физики является изучение закономерных соотношений не между вещами и телами, которые лишь кажутся существующими вне нас, а между комплексами наших ощущений. Бытие тех или иных вещей вне нас объявляется «гипотезой», «рабочей гипотезой». И как всякая гипотеза, подобного рода предположение не является чем-то незыблемым. В зависимости от точки зрения, в зависимости от «удобства» различные основные и дополнительные «рабочие гипотезы» считаются приемлемыми, лишь бы они не приводили к формальным противоречиям при анализе соотношений между «комплексами ощущений», которые мы называем «вещами» якобы только вследствие простой привычки.

Итак, главная установка феноменализма, как и солипсизма, заключается в том, что сознание есть нечто основное, первичное. Подчиненную по отношению к сознанию роль играют ощущения, на базе которых создаются «рабочие гипотезы» о существовании вне нашего сознания различных вещей с теми или иными свойствами. Указанная общая схема, в явном или скрытом виде, может быть прослежена во всех разновидностях феноменализма. В своих философских построениях Мах пытался, вступив на путь своеобразного эклектизма, использовать некоторые понятия, казалось бы, относящиеся к вещам, реально существующим вне нашего сознания, но все это приводится в такой сбивчивой форме, что его феноменализм, последовательно развиваемый, сближается с солипсизмом. Из рассуждений Маха неизбежно следует, что мир есть только наше представление.

В книге В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» содержится исчерпывающий анализ махизма и выявлено его антиматериа-
64
листическое содержание. Вместе с тем В. И, Ленин показал в этой книге, что миросозерцание, наиболее соответствующее действительности, должно рассматривать в качестве первичного вещи и тела, которые объективно существуют вне нашего сознания и совершенно независимо от нашего сознания. К такому утверждению приводит весь многообразный опыт, приобретенный человечеством на протяжении ряда тысячелетий его существования. Это направление мысли проходит красной нитью через все естествознание, которое не могло бы развиваться, если бы в науке господствовало представление о мире как о чем-то лишь воображаемом. В отдельных случаях у некоторых естествоиспытателей бывали и бывают уклонения в сторону идеалистических установок, но в основном наука о природе стихийно идет по пути признания объективной реальности изучаемых предметов. Мир объективно существовал еще до появления мыслящего человека. С этой точки зрения, ощущения, связанные с восприятием нашими органами чувств воздействия со стороны внешнего мира, и затем наше сознание являются чем-то, соподчиненным внешнему миру по своей форме и содержанию. Наше представление о вещах внешнего мира есть отображение этих вещей в нашем

сознании, отображение приблизительное, но непрерывно совершенствующееся по мере развития науки о природе и постепенно приближающееся к наибольшему соответствию с тем, что происходит в действительности.

4. Положения II и III содержат в высокой степени краткую формулировку сущности наших общих воззрений, касающихся материи как объективной реальности, без непременного участия которой принципиально не мыслимо какое бы то ни было физическое явление.

Представление о материи, в общефилософском смысле, охватывает собою не только так называемую гравитационную материю, т. е. вещество, из которого состоят обычные тела разного рода, но и вообще все то, что лежит в основе каких бы то ни было иных физических объектов (например электромагнитного поля, квантов лучистой энергии и т. п.).

Положение II говорит о том, что материя объективно-реально существует вне нашего сознания, независимо от нашего сознания. При нашем соприкосновении с внешним миром мы получаем разного рода ощущения через посредство органов чувств. Комплексы этих ощущений составляют основное содержание нашей мозговой деятельности, и таким именно образом материальный мир отображается в нашем сознании.

Положение III — «В мире нет ничего, кроме движущейся материи...»— отнюдь не отрицает объективной реальности нашего сознания, т.-е. психической стороны в деятельности нервных центров, которыми обладают представители животного мира. Суть дела в том, что «материя, природа, бытие, физическое есть первичное, а дух, сознание, ощущение, психическое — вторичное».[1] С материалистической точки зрения, наше сознание не есть нечто самодовлеющее,

[1] Ленин. Соч., т. ХШ, стр. 120.

существующее само по себе и независимо от чего бы то ни было другого. «Ощущение, мысль, сознание есть высший продукт особым образом организованной материи». [1]

В положении III говорится о движущейся материи. В ряде случаев иногда все происходит так, как будто бы материя остается неподвижной. Мы, например, весьма часто говорим о некотором неподвижном теле, имея при этом в виду неизменность взаимного расположения данного тела и других, окружающих его тел. Однако внимательное рассмотрение подобных случаев убеждает нас в том, что и здесь, по существу, мы имеем дело с движущейся материей. С одной стороны, всякая группа тел, кажущаяся неподвижной, в 'действительности участвует во вращении земли вокруг ее оси, в поступательном движении земли вдоль орбиты вокруг солнца и т. д. С другой стороны, вещество, образующее рассматриваемые тела, состоит из непрерывно движущихся молекул и атомов, которые в свою очередь состоят из электронов, протонов и тому подобных элементарных частей, также находящихся в непрерывном движении и не представляющих собою последней ступени в познании движущейся материи. Изучение всех без исключения физических процессов всегда делает шаг вперед, вскрывая те или иные пространственные перемещения, имманентно связанные с этими процессами. Представить себе материю, находящуюся в абсолютном покое, мы не можем. «Метафизический, т. е. антидиалектический, материалист может принимать существование материи (хотя бы временное, до «первого толчка» и т. п.) без движения. Диалектический материалист не только считает движение неразрывным свойством материи, но и отвергает упрощенный взгляд на движение и т. д.». [2] Вместе с тем мы не можем себе представить и какое бы то ни было движение отделенным от того, что движется и что именно в связи с наличием движения оказывается носителем соответствующего количества движения и определенного количества энергии. Представление о движении вне обязательной ассоциации с материей, которая движется, так же как и представление об энергии в качестве чего-то, существующего самостоятельно и вне связи с материей, которая является носителем энергии, — такого рода представления неизбежно влекут за собою уклонение физической мысли в область антиматериалистических построений. «Существенно то, что попытка мыслить движение без материи протаскивает мысль, оторванную от материи, а это и есть философский идеализм».[3] «На деле, мысленное устранение материи, как «подлежащего» из «природы», означает

молчаливое допущение мысли как «подлежащего» (т. е. как чего-то первичного, исходного, независимого от материи) в философию».[4]

Наконец, в положении III указывается, что «движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени». Дей-

[1] Ленин. Соч. т. XIII, стр. 45.
[2] Там же, стр. 221.
[3] Там же, стр. 220.
[4] Там же, стр. 221.

66

ствительно, под движением (в узком смысле этого слова) мы разумеем изменение во взаимном расположении данного объекта и других, окружающих его объектов. С этим непосредственно связано представление о пространственном расположении рассматриваемых объектов и о самом пространстве как о чем-то, неразрывно связанном с существованием материи вообще. Сверх того, рассмотрение всякого движения, всякого изменения, которое происходит в системе тех или иных материальных объектов, приводит нас к констатации еще одного важного обстоятельства, характеризующего общие условия существования материи. Дело в том, что каждое движущееся тело может занимать и в действительности занимает в пространстве самые разнообразные положения но отношению к другим телам. Однако опыт показывает, что данное тело не находится и в одном месте, и в другом, и в третьем, и т. д. Мы можем только сказать, что это тело находится или в одном месте, или в другом месте, или в третьем месте, и т. д. Обязательность этого «или» связана с представлением о чередовании различных положений тела. Точно так же всякое изменение в состоянии того или иного объекта или системы объектов есть результат чередования отдельных состояний. Эти чередования отображаются в нашем сознании в виде представления о времени как о некоторой форме существования материи. Мы не можем мыслить что бы то ни было вне пространства и времени. Еще Гегель, говоря о движении в смысле пространственного перемещения, указывал: «Его сущностью является та черта, что оно есть непосредственное единство пространства и времени: оно есть существующее благодаря пространству реальное время, или, иначе говоря, теперь только благодаря времени подлинно различенное пространство. Таким образом мы знаем, что в движение входит время и пространство...». [1]

В развитие положений II и III можно привести еще нижеследующее высказывание Ф. Энгельса, [2] в котором он в высокой степени образно резюмирует сущность материалистических представлений о природе:

«Материя движется в вечном круговороте, завершающем свою траекторию в такие промежутки времени, для которых наш земной год не может служить достаточной единицей; в круговороте, в котором время наивысшего развития, время органической жизни и еще более жизни сознательных существ столь же скудно отмерено, как пространство в жизни и в самосознаний: в круговороте, в котором каждая отдельная форма существования материи — безразлично, солнце или туманность, отдельное животное или живой вид, химическое соединение или разложение — одинаково преходяща, и в котором ничто не вечно, кроме вечно изменяющейся, вечно движущейся материи и законов ее движения и изменения. Но, как бы часто и как бы безжалостно ни совершался во времени и в пространстве этот

[1] Гегель. «Философия природы». Соч. т. II, стр. 59. Перевод под редакцией А. А. Максимова. Соцэкгиз. М. и Л. 1934.
[2] Ф. Энгельс. «Диалектика природы», стр. 99, Партиздат. 1933,

67

круговорот, сколько бы бесчисленных солнц и земель ни возникало и ни погибало, как бы долго ни приходилось ждать, пока в какой-нибудь солнечной системе, на какой-нибудь планете не появятся условия, необходимые для органической жизни, сколько бы бесчисленных существ ни должно было

погибнуть и возникнуть, прежде чем из их среды разовьются животные с мыслящим мозгом, находя на короткий срок пригодные для своей жизни условия, чтобы затем быть тоже истребленными без милосердия, — мы все же уверены, что материя во всех своих превращениях остается вечно одной и той же, что ни один из ее атрибутов не может погибнуть и что поэтому с той же самой железной необходимостью, с какой она некогда истребит на земле свой высший цвет — мыслящий дух, она должна будет его снова породить где-нибудь в другом месте и в другое время». [1] 5. Положение IV гласит, что «пространство и время — не простые формы явлений, а объективно-реальные формы бытия». Подобно тому как материя не есть продукт деятельности нашего сознания, а объективно-реально существует вне нашего сознания, точно так же и основные формы существования материи — пространство и время — объективно-реальны. «Человеческие представления о пространстве и времени относительны, но из этих относительных представлений складывается абсолютная истина, эти относительные представления, развиваясь, идут по линии абсолютной истины, приближаются к ней. Изменчивость человеческих представлений о пространстве и времени так же мало опровергает объективную реальность того и другого, как изменчивость научных знаний о строении и

[1] В природе мы весьма часто встречаемся с явлениями, имеющими характер круговорота. Так, мы наблюдаем круговорот земли вокруг солнца, круговорот земли вокруг ее оси и т. д. и т. п. вплоть до ряда явлений в области микрокосмоса. Но во всех этих случаях мы никогда не имеем дела с абсолютным круговоротом, т.-е. с абсолютно точным повторением пройденного цикла изменений. По причине бесконечного разнообразия взаимоотношений, которые имеют место среди бесчисленного множества физических реальностей всякого рода, в природе не может быть абсолютно точного повторения какого-либо пройденного цикла, а может встречаться лишь приблизительное повторение подобного цикла, причем степень приближения, представляется большей или меньшей в зависимости от общей обстановки и от того, насколько мы отвлекаемся от мироздания в целом, сосредоточивая внимание на определенном комплексе физических реальностей. Например, говоря о круговороте земли вокруг солнца, мы обычно отвлекаемся от большого количества других обстоятельств и, между прочим, от того несомненного факта, что вся солнечная система движется в пределах нашей галактики и, следовательно, изменяет свое расположение относительно других небесных тел и их систем. В то же время и на земле, и на солнце, и на всех других небесных телах происходят самые разнообразные изменения физико-химического, метеорологического, геологического и т. п. характера. Аналогичное можно утверждать и относительно всех без исключения других круговоротов, которые встречаются в действительности. Таким образом, говоря о том или ином круговороте во вселенной, необходимо иметь в виду относительность этого круговорота, который всегда происходит на фоне непрерывного и бесконечного развития всего мироздания в целом. И, конечно, в вышеприведенных словах Ф. Энгельса речь идет именно об относительном круговороте грандиозного по времени и пространству масштаба. (Примечание, добавленное в 1939 г.)

68

формах движения материи не опровергает объективной реальности внешнего мира».[1]

В общей теории относительности Эйнштейна, несомненно, отражаются начала материалистического миропонимания, когда пространство и время рассматриваются в неразрывной связи с гравитационной материей и именно как форма существования этой материи.

Пользуясь понятиями пространства и времени в научном языке и в обычной речи, мы весьма часто абстрагируем данные понятия и рассуждаем так, как будто бы эти основные формы существования материи представляют собою нечто самостоятельное и независимое от материи. Так, например мы говорим о каком-либо объеме пространства, в котором размещены те или иные тела как в некотором вместилище. Разного рода физические процессы и происходящие при этом, движения мы рассматриваем на фоне данного объема пространства как некоторой арены, существующей как будто вполне самостоятельно. Если все это делается с учетом того, что в действительности пространство есть лишь форма существования материи и неотделимо от нее, если такие обороты речи мы

сознательно допускаем лишь как удобный условный язык, — в этом нет ничего антиматериалистического. Однако весьма часто забывают о такого рода условности и совершенно игнорируют ее. На этой почве возникло чисто идеалистическое представление об абсолютно пустом пространстве как о чем-то самодовлеющем, что может объективно-реально существовать само по себе. Это есть один из наиболее ярких примеров фетишизма в области физической науки.

На основании всего сказанного выше совершенно очевидно, что абсолютная «пустота» есть абстракция (следствие 1-е положения IV). Ведь пространство есть лишь форма существования материи, и потому оно не мыслимо без заполняющей его вечно движущейся материи. Встречаются софистические попытки оправдать представление об абсолютно пустом пространстве ссылкой на то, что в некотором теле может существовать внутренняя пустая полость и она якобы может быть абсолютно пустой, так как мы имеем право рассматривать охватывающую ее замкнутую поверхность в качестве внутренней границы (т.-е. внутренней «формы») материи, образующей данное тело. Упускается при этом из вида, что внутри такой полости мы всегда можем выделить произвольный объем, не соприкасающийся с границей полости. В случае абсолютной пустоты в этой полости, рассматриваемый объем оказывается не имеющим никакого отношения к материи, которой не будет ни внутри данного объема, ни непосредственно снаружи его. Следовательно, этот произвольно выделенный объем не является формой существования какой-либо материи и не есть нечто объективно-реальное, а представляет собою такую же чистую абстракцию, как и вся якобы абсолютно пустая полость.

Итак, абсолютно пустого пространства в природе не бывает. Это есть лишь нечто воображаемое. И, тем не менее, мы знаем ряд случаев,

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 144.

когда пространство не содержит обычной материи и кажется нам совершенно пустым. На основании положения IV, такое пространство необходимо считать заполненным чем-то материальным. За неимением более подходящего термина для обозначения материального содержания «пустого» пространства приходится пользоваться словом «эфир». Оставляя пока в стороне вопрос о природе и о структуре эфира, мы можем утверждать только одно, а именно, что он непрерывно заполняет все пространство. В противном случае мы должны были бы допустить абсолютную пустоту хотя бы в пределах очень малых элементарных объемов пространства. В связи со сказанным мы приходим к заключению, что именно в эфире происходят те процессы, которые характеризуют электромагнитное поле, вообще, и электрическое поле, магнитное поле, в частности, а также гравитационное поле.

В современной физической науке господствует отрицательное отношение к эфиру как материальной основе процессов, происходящих в так называемом пустом пространстве. В стремлении придать материалистическую окраску вытекающим отсюда физическим представлениям концепцию материи иногда подменяют концепцией пространства и говорят о том, что само пространство материально и что перечисленные выше поля представляют собою не что иное, как свойство пространства. При этом, однако, мысль не доводится до конца и не указывается четко и ясно, что в этих рассуждениях пространство рассматривается не как форма существования материи, а в качестве самой материи. Все эти уклоны научной мысли необходимо отнести к области физического идеализма.

Заслуживает известного внимания вопрос о том, какое именно пространство мм должны иметь в виду, говоря о физических явлениях, совершающихся в этом пространстве. Иными словами, вопрос идет о том, сколькими измерениями обладает физическое пространство. Совершенно подобно тому, как поверхность, например, шара есть двухмерное пространство несмотря на наличие его кривизны, точно так же и физическое пространство, которое представляет собой форму существования вечно движущейся материн и в котором происходят явления, изучаемые физической наукой, есть пространство трехмерное несмотря на его возможную кривизну, в соответствии с общей теорией относительности. Вся совокупность того, что мы знаем о природе, не допускает мысли о существовании физических объектов вне трехмерного пространства. В связи с идеалистическими

течениями в физической науке, пытавшимися отрицать вышесказанное (и до настоящего времени иногда, к сожалению, вновь возрождающимися), В. И. Ленин в свое время сказал, между прочим, следующее: «Естествознание не задумывается над тем, что вещество, которое им исследуется, существует не иначе, как в пространстве с 3-мя измерениями, а, следовательно, и частицы этого вещества, хотя бы они были так мелки, что видеть мы их не можем, «обязательно» существуют в том же пространстве с 3-мя измерениями».[1]

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 148.

70

Таким образом, рассматривая различные явления природы, мы всегда и неизменно должны иметь в виду трехмерное физическое пространство. Пытаясь выйти за пределы этого объективно-реального пространства, мы становимся на антиматериалистический путь.

Только что сказанное нисколько не противоречит закономерности использования идеи о многомерных пространствах в математических операциях, к которым иногда весьма целесообразно и даже необходимо прибегать в некоторых специальных отделах современной теоретической физики. В области математического анализа физических явлений не может быть никаких ограничений для формально правильного развития соответствующих операций. Но в области физического мышления, в особенности при истолковании физического значения полученных математическим путем результатов, несомненно, приходится считаться с некоторыми ограничениями, вытекающими из наших общих, принципиальных установок, и не выходить за пределы той пространственно-временной непрерывности, в которой имеют место физические явления.[1]

Аналогично идеалистическому представлению о пространстве самом по себе, не ассоциируемом с движущейся материей, в науке существовало неправильное представление о времени самом по себе, вне какой бы то ни было ассоциации с процессами, протекающими в материальном мире. Теория относительности в значительной степени исправила эту ошибку, тесно связав временную протяженность с условиями существования гравитационной материи. Оставляя в стороне вопрос о том, в какой мере, возможно говорить о всеобщем времени как форме существования всего мира в целом, необходимо, во всяком случае категорически отвергнуть представление об абсолютном времени, совершенно независимом от вечно движущейся материи, и признать подобного рода представление чистой абстракцией (следствие 2-е положения IV).

Итак, «основные формы всякого бытия суть пространство и время, и бытие вне времени такая же бессмыслица, как бытие вне пространства». [2]

6. В положениях V и VI речь идет о физической реальности. В каждом явлении природы мы всегда имеем дело с разного рода объективными реальностями, которые играют роль носителей свойств, обнаруживаемых в этом явлении и изучаемых различными отделами естествознания. Физика, будучи основной наукой о природе, имеет дело с самыми общими свойствами этих объективных реальностей, которые можно назвать физическими реальностями, поскольку они участвуют в том или ином физическом явлении. Самое существенное, что можно утверждать о любой физической реальности, — это следующее: в каком бы виде она ни представлялась в процессе эксперимента, она есть не что иное, как некоторая форма движущейся материи (положение V). Других физических реальностей не существует в природе.

[1] См. акад. В. Ф. Миткевич. Сборник «Основные физические воззрения», стр. 51. 1936. 2-е изд. (настоящий сборник, статья III).

[2] Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 36,Партиздат. 1934.

71

Можно привести бесчисленное количество примеров физических реальностей. Разного рода тела, состоящие из гравитационной материи (вещества), в том числе молекулы, атомы, электроны, протоны и прочие составные части атомов, струя жидкости или газа, воздушный вихрь (смерч), пламя, звуковая волна, электрический ток, электромагнитное поле, поток электрического смещения,

магнитный поток, световой квант и т. д., — все это физические реальности, которые представляют собою лишь те или иные формы движущейся материи, в самом общем смысле этого слова. Различные формы, которые принимает движущаяся материя, проявляются в виде различных качественно отличающихся физических реальностей. И все это, конечно, справедливо как в отношении макрофизических, так и в отношении микрофизических явлений.

Объективно-реальное трехмерное пространство есть форма существования материи. При этом абсолютно пустого пространства в действительности не может быть. Абсолютная «пустота» есть нечто воображаемое, абстракция (следствие 1-е положения IV). Реальное пространство Непрерывно заполнено материей. Следовательно, материю мы должны мыслить пространственно, т.-е. каждую сколь угодно малую часть материи мы обязательно должны представлять себе не иначе, как заполняющей соответствующий ей объем трехмерного пространства. И этот объем, конечно, должен иметь строго определенную локализацию в пространственно-временной непрерывности. Соответственно этому и любая сколь угодно малая часть какой бы то ли было физической реальности обладает некоторым объемом не равным нулю и локализована в пространстве и времени (положение VI). Только таким образом и может осуществляться бытие какой-либо физической реальности в пространстве и времени. То, что не может быть локализовано в пространстве и времени, что не занимает в каждый данный момент времени определенного места в пространстве, существует вне пространства и времени, т.-е. реально не существует, а есть лишь фикция, которой нет места в физическом мышлении.

Ярким примером незакономерного и в корне антиматериалистического хода рассуждений могут служить некоторые своеобразные попытки физически интерпретировать отдельные выводы современной квантовой механики. Так, известное соотношение неопределенности я связанный с ним принцип дополнительности дают некоторым представителям физической науки повод утверждать, что, экспериментируя в области микрофизических явлений, мы имеем дело с объектами, которые принципиально не могут быть локализованы в пространстве и во времени, так что говорить о движении этих объектов по соответствующим траекториям не имеет никакого смысла. Совершенно очевидно, что какие бы то ни было объекты, находящиеся вне пространства и времени, являются не физическими реальностями, а продуктами идеалистических установок тех, кто их придумал. И, конечно, подобного рода нереальные объекты не могут принимать участия в каких-либо физических процессах. Суть дела в том, что соотноше-

72

ние неопределенности, несомненно, представляющее собой ценный результат математического анализа данных физического эксперимента в области явлений атомного масштаба, не должно быть интерпретируемо как доказательство каких-то мистических вновь открытых свойств материи, состоящих в том, что элементы материи будто бы могут временно прекращать свое бытие в трехмерном физическом пространстве. Это есть как раз та «бессмыслица», о которой в свое время говорил Ф. Энгельс. [1] Из того, что мы не умеем достаточно точно определить одновременно и место нахождения некоторого объекта и его скорость, отнюдь не следует, что теряет всякий смысл представление о траектории этого объекта и что он в действительности не локализован в пространстве и времени. Еще задолго до возникновения квантовой механики были известны случаи, когда по тем или иным причинам нельзя точно проследить траекторию каждого отдельного объекта, участвующего в каком-либо физическом явлении. Так, например, место нахождения некоторой данной молекулы газа в каждый момент времени и ее скорость недоступны точному наблюдению и определению. Тем не менее, мы не сомневаемся в том, что данная молекула движется по некоторой определенной траектории и строго локализована в пространстве и времени. Подобным же образом физик, стоящий на материалистических позициях, не может подвергать сомнению неизменное пребывание внутриатомного электрона в пределах объективно-реальной пространственно-временной непрерывности. Точно так же не может быть и речи о том, будто бы теряет физический смысл самое представление о траектории внутриатомного электрона в связи с невозможностью точного определения этой траектории. Итак, отрицание объективно-реальной локализации внутриатомных

электронов, световых и гравитационных квантов и т. п. в пространстве и времени, по существу, равносильно утверждению, что все эти предметы исследования в действительности не являются физическими реальностями, по крайней мере, в течение промежутков времени между моментами, когда они внезапно порождаются в трехмерном пространстве, обнаруживаясь при соответствующем физическом эксперименте, и затем вновь уходят в небытие. Видеть в этом какие-то вновь открытые свойства материи, как это делают некоторые физики, это значит становиться на позиции чистейшего махизма и создавать себе фетиши. Идеалистический характер подобных рассуждений вполне очевиден, несмотря на маскирование их под «материализм» путем оперирования термином «материя».

7. Положение VII и VIII представляют собой развитие основной мысли, содержащейся в положении III, где говорится, что «в мире нет ничего, кроме движущейся материи...»

Грандиозные успехи современной физики, в связи с некоторыми попытками антиматериалистической интерпретации результатов математического анализа физических явлений, настолько отвлекли вни-

[1] Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 36.

мание исследователей природы от ряда совершенно здравых и непреложных утверждений старой, классической физики, что теперь считается чем-то весьма предосудительным говорить о пространственных перемещениях, входящих в состав таких физических процессов, в которых движение материи недоступно непосредственному наблюдению (например, электромагнитное поле, магнитный поток, дифракция электронов и т. д.). [1] Нередко при этом рассмотрение подобных пространственных перемещений квалифицируется в качестве приверженности к механистической точке зрения. На этой почве возникло и продолжает возникать немало недоразумений, препятствующих правильной постановке вопроса о возможно более глубоком понимании природы физических явлений.

Положение VII констатирует, что «законы движения... материи отражает механика по отношению к медленным движениям, электромагнетическая теория — по отношению к движениям быстрым». Что касается движений, рассматриваемых в механике и обычно называемых механическими движениями, то в этом отношении не наблюдается особых поводов для антиматериалистических высказываний со стороны представителей современной физической науки. Но совершенно иначе обстоит дело в отношении вопроса о природе электромагнитных явлений.

В качестве примера идеалистических уклонов в современной физической науке можно привести отрицательное отношение к общим идеям Максвелла касательно процессов электромагнитного характера. Как известно, Максвелл в своей электродинамике, в строгом соответствии с материалистическими установками Фарадея, исходит из представления об электрокинетической энергии системы токов, как энергии, определяемой движениями особого рода, происходящими в пространстве, которое окружает проводники с током и в котором находится весь магнитный поток, связанный с данной системой токов. Максвелл показал, что эта электрокинетическая энергия есть не что иное, как именно энергия магнитного потока системы токов. Таким образом, магнитный поток, играющий принципиально важную роль при всевозможных энергетических преобразованиях в современных электротехнических устройствах и механизмах, есть физическая реальность, т.-е. представляет собой особую форму движущейся материи.

Насколько большое значение придавал Максвелл идее о движущейся материи как об основном фоне физического мышления, явствует из следующих его слов, сказанных по поводу энергии тока:

«Энергия электрического тока может быть отнесена или к той форме энергии, которая определяется действительным движением материи, или к той, которая определяется способностью приходить

[1] В настоящем пункте автор считает целесообразным повторить многое из того, что было сказано в его статье «О механистической тачке зрения в области основных физических представлений». См.

Сборник «Основные физические воззрения», стр. 58—66. 1936. 2-е изд. (настоящий сборник, статья V).
74
в движение под влиянием сил, действующих между телами, находящимися в определенных положениях одно относительно другого. Первый вид энергии, энергия движения, носит название кинетической, и, если углубиться в понимание этого вида энергии, он представляется столь фундаментальным фактом природы, что нам трудно вообразить себе возможность сведе'ния его к чему-либо иному. Второй вид энергии, зависящий от положения, называется потенциальной энергией и обусловливается действием того, что мы называем силами, т.-е. того, что имеет стремление изменять относительное положение. Что касается этих сил, то хотя мы и можем принять их существование как опытный факт, однако, всегда чувствуем, что всякое объяснение механизма, благодаря которому тела приводятся в движение, представляет собой реальный вклад в наше знание». [1]

Современная физика в значительной степени отошла от вышеуказанных материалистических установок Фарадея и Максвелла и, вместо того чтобы руководствоваться ими при рассмотрении всех новейших достижений и открытий, уклонилась в сторону феноменологии и в огромном большинстве случаев довольствуется формально-математическим описанием физических явлений. Рассмотрение природы электромагнитного поля с точки зрения тех движений материи, которые в этом поле происходят, считается чем-то мало соответствующим достоинству подлинной науки.

В настоящее время обычно принято самым категорическим образом отвергать возможность того, что всякий электромагнитный процесс, вообще, и, в частности, всякий электрический или магнитный процесс обязательно заключает в себе пространственные перемещения более или менее сложной формы. Но если допускать эти пространственные перемещения, мы неизбежно должны иметь в виду то, что перемещается, что движется. Придерживаясь материалистической точки зрения, мы говорим о перемещениях объемных элементов эфира, который непрерывно заполняет так называемое «пустое» пространство. Противоположная, идеалистическая установка, отрицающая объективную реальность эфира, постулирует существование абсолютно пустого пространства как чего-то самодовлеющего. С этой точки зрения, как было указано выше, электромагнитное поле не есть некоторая форма движущейся материи, а представляет собой лишь особое свойство пространства, причем делается антиматериалистическое утверждение, что подобное самодовлеющее пространство «материально». Понятно, что ни о каких пространственных перемещениях в данном случае не может быть и речи. К этой же категории идеалистических построений относится выдвинутое Эйнштейном и разделяемое некоторыми советскими учеными представление о так называемом «не-механистическом» эфире, т.-е. о таком «эфире», к отдельным объемным элементам которого ни в коем случае нельзя

[1] J. C. Maxwell. «Treatise on Electricity and Magnetism». Vol. II. p. 211, § 568, 1893, third edition.
75
применять понятие пространственного перемещения. Однако подобный мистический «эфир» является чем-то физически бессодержательным, и термин этот, понимаемый в эйнштейновском смысле, представляет собой в действительности не что иное, как лишь своеобразный синоним термина «абсолютная пустота». Ясно, конечно, что нет никакого физического смысла говорить о пространственных перемещениях объемных элементов «абсолютной пустоты». Сторонники эйнштейновского «эфира», таким образом, отрываются от объективной действительности и уклоняются в сторону физического идеализма. Ведь электромагнитная теория отражает законы движения материи «но отношению к движениям быстрым» (положение VII).

Достойно особого внимания следующее обстоятельство, отмеченное еще в пункте 4-м настоящей статьи. Все главнейшие успехи современной физики, по существу, тесно связаны с выяснением тех движений, тех пространственных перемещений, которые происходят в различных процессах или в различных физических комплексах, воспринимавшихся ранее как нечто неделимое и неразложимое

на составные части. Так, например атом обычной материи предстал теперь перед взором исследователя как целый микрокосмос, как обособленный мир, части которого находятся в непрерывном движении. Эти составные части (электроны, протоны и т. д.), казавшиеся не так еще давно какими-то предельными физическими реальностями, в свою очередь, благодаря открытию дифракции материальных лучей и успехам теоретической физики, в настоящее время представляются в качестве специфических комплексов, имеющих волновую природу. Правда, методы формально-математического описания соответствующих волновых процессов хотя и отражают действительные соотношения, однако основаны на использовании таких представлений (фазовые волны в многомерных пространствах сколь угодно большого числа измерений), которые не поддаются простой, физической интерпретации и должны быть понимаемы лишь как чисто условное, вспомогательное орудие, вполне законное при математическом анализе, но не при рассмотрении истинной природы явлений. Только весьма распространенной привычкой к ошибочной интерпретации математических абстракций можно объяснить то, что некоторые противники материалистической трактовки физических явлений утверждают, будто бы реальной причиной, обусловливающей дифракцию, например, электронов, являются фазовые волны, распространяющиеся в многомерных пространствах. Ясно, конечно, что подлинно реальной причиной дифракции электронов могут быть только волновые процессы, происходящие именно в физическом трехмерном пространстве и имеющие непосредственное отношение к природе электронов. Совершенно очевидно также, что волновые процессы, связанные с электронами, не следует примитивно понимать как упругие колебания объемных элементов эфира, по примеру справедливо отброшенных теперь представлений классической оптики, но необходимо рассматривать эти волновые процессы как имеющее периодический характер специфическое движение сложной формы, в состав которого, в конце

концов, должны входить и элементарные пространственные перемещения.

Необходимо отметить еще одно обстоятельство, очень характерное для современной борьбы на научно-философском фронте. Некоторые ученые, совершенно определенно придерживающиеся идеалистических установок, весьма решительно высказываются против признания движений материи в качестве основы всякого физического процесса якобы по тем мотивам, что механицизм есть неправильное течение научно-философской мысли. Конечно, необходима самая решительная борьба с механицизмом, но вместе с тем необходимо твердо помнить, что диалектический материализм не допускает существования какого бы то ни было физического процесса, т. с. движения в общефилософском смысле, не заключающего в себе механических движений или вообще перемещений больших или мельчайших частей материи. Познать эти пространственные перемещения «является первой задачей науки, однако лишь первой» (положение VIII).

Сущность механистической точки зрения в области физических представлений состоит не в признании обязательного наличия механических движений или вообще пространственных перемещений материи во всяком физическом процессе, а в ошибочном предположении, будто бы новые качественные характеристики, которыми всегда обладает любая сложная комбинация каких-либо элементарных составляющих, могут быть разложены на простейшие свойства этих элементарных составляющих, и, в частности, в попытках сведения специфических особенностей всякого физического процесса к свойствам элементарных пространственных перемещений материи. Признание, эфира, который непрерывно заполняет все наше трехмерное физическое пространство и объемные элементы которого участвуют в движении, характеризующем, например, магнитное ноле, само по себе еще не является признаком механистической точки зрения. Специалист в области теоретической механики не должен быть относим к категории приверженцев механицизма только потому, что он занимается изучением механических движений. Нельзя в данном случае рассуждать с точки зрения филологических признаков.

Положение VIII весьма четко констатирует, что задача изучения того или иного физического процесса, т. е. движения, понимаемого в общефилософском смысле, ни в коем случае не

исчерпывается, как это допускают некоторые сторонники механицизма, познанием связанных с данным процессом и заключающихся в нем механических движений или вообще пространственных перемещений материи. Это есть лишь первая задача науки. «Открытие, что теплота представляет собой молекулярное движение, составило эпоху в науке. Но если я не имею ничего другого сказать о теплоте, кроме того, что она представляет собою известное перемещение молекул, то лучше мне замолчать».[1] Эти слова Энгельса являются ценным руководящим указанием, направляющим исследователя природы на путь диалек-

[1]Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 249.

тического материализма. В связи с этим мы ни в коем случае не можем считать завершенной задачу изучения некоторого физического явления, когда нам удается выяснить, какие именно элементарные физические процессы в пределе, какие именно пространственные перемещения материи имманентно входят в состав данного сложного процесса. Остается еще большая работа по изучению специфических особенностей, новых качественных характеристик обследуемой совокупности, воспринимаемой нами как некоторое физическое явление своего рода. Здесь говорится о новых качественных характеристиках в том смысле, что они не могут быть рассматриваемы в качестве простой суммы некоторых свойств, принадлежащих элементарным процессам, которые заключаются в данном сложном явлении.

Во избежание каких бы то ни было недоразумений необходимо твердо помнить, что в общефилософском смысле «движение вовсе не есть простое перемещение, простое изменение места, в над-механических областях оно является также и изменением качества. Мышление есть тоже движение».[1] Как мы указывали выше, с диалектической точки зрения, и всякий физический процесс есть движение. Однако, повторяем еще раз, в состав любого движения обязательно входит и простое движение материи, т.-е. пространственное перемещение больших или мельчайших се частей. «Всякое движение связано с каким-нибудь перемещением — перемещением небесных тел, земных масс, молекул, атомов или частиц эфира. Чем выше форма движения, тем мельче это перемещение. Оно нисколько не исчерпывает природы соответствующего движения, но оно неотделимо от него. Поэтому его приходится исследовать раньше всего остального». [2] Наиболее доступная непосредственному наблюдению форма движения материи есть так называемое механическое движение, т.-е. пространственное перемещение обычной гравитационной материи. С механическим движением мы встречаемся во всех случаях, относящихся к области механики, теоретической и прикладной, в таких физических явлениях, как генерация и распространение звука, тепловое состояние вещества, вихревые образования в газах и в жидкостях и т. д. Но в случае, например, электромагнитных явлений мы имеем дело с какими-то, еще недостаточно изученными пространственными перемещениями особой материи (эфира).

Таким образом, при рассмотрении разного рода физических процессов необходимо иметь в виду, кроме обычных механических движений, еще некоторое специфическое движение, которое можно назвать электромагнитным движением материи. В связи с достижениями современной физической науки все более и более вскрывается электромагнитная природа мельчайших составных частей обычного вещества, т.-е. гравитационной материи. Не исключена возможность, что при дальнейшем развитии науки вся гравитационная материя с ее наиболее характерным свойством — массой — предстанет

[1] Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 249.

[2] Ф. Энгельс. «Диалектика природы», стр. 130. Партиздат. 1933.

перед взором физика как весьма сложный комплекс элементарных процессов электромагнитного характера. Возможно также, что в будущем и электромагнитная интерпретация явлений природы претерпит ту или иную метаморфозу. Диалектический материализм не видит предела в развитии наших представлений о природе, непрерывно приближающихся по мере углубления наших знаний ко все большему и большему соответствию с тем, что происходит в действительности. При этом ни в коей степени не отрицается объективная реальность наиболее высоких форм проявления движущейся материи. «Это, конечно, сплошной вздор, будто материализм утверждал «меньшую» реальность сознания или обязательно «механическую», а не электромагнитную, не какую-нибудь еще неизмеримо более Сложную картину мира, как движущейся материи».[1]

8. Проблема причинности занимает в современной физике одно из главных мест. Разногласия по этому поводу в высокой степени выпукло отражают длящуюся на всем протяжении истории естествознания и философии борьбу двух мировоззрений — материалистического и идеалистического. В, И. Ленин на страницах своей книги «Материализм и эмпириокритицизм» подверг беспощадной критике неправильные установки по вопросу о причинности. Касаясь материалистического характера взглядов Л. Фейербаха, В. И. Ленин говорит:

«Итак, Фейербах признает объективную закономерность в природе, объективную причинность, отражаемую лишь приблизительно верно человеческими представлениями о порядке, законе и проч. Признание объективной закономерности природы находится у Фейербаха в неразрывной связи с признанием объективной реальности внешнего мира, предметов, тел, вещей, отражаемых нашим сознанием. Взгляды Фейербаха — последовательно материалистические. И всякие иные взгляды, вернее, иную философскую линию, в вопросе о причинности, отрицание объективной закономерности, причинности, необходимости в природе, Фейербах справедливо относит к направлению фидеизма. Ибо ясно, в самом деле, что субъективистская линия в вопросе о причинности, выведение порядка и необходимости природы не из внешнего объективного мира, а из сознания, из разума, из логики и т. п. не только отрывает человеческий разум от природы, не только противопоставляет первый второй, но делает природу частью разума, вместо того, чтобы разум считать частичкой природы. Субъективистская линия в вопросе о причинности есть философский Идеализм (к разновидностям которого относятся теории причинности и Юма и Канта), т.-е. более или менее ослабленный, разжиженный фидеизм. Признание объективной закономерности природы и приблизительно верного отражения этой закономерности в голове человека есть материализм».[2]

Положение IX представляет собой констатацию вышеуказанной

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 229.

[2] Там же, стр. 127.

основной материалистической установки, причем приведенные в этом положении слона В. И. Ленина сказаны им в качестве характеристики взглядов Энгельса по рассматриваемому вопросу.

Такие понятия, как причина и следствие, служат для описания соподчиненности некоторых двух событий, вообще говоря, следующих одно за другим во времени и лишь иногда кажущихся нам одновременными. При этом «человеческое понятие причины и следствия всегда несколько упрощает объективную связь явлений природы, лишь приблизительно отражая ее, искусственно изолируя те или иные стороны одного единого мирового процесса».[1] Таким образом, соотношение причины со следствием, т.-е. так называемая причинная связь, с материалистической точки зрения, не есть простой продукт деятельности нашего сознания, но является отображением в нашем сознании объективно-реальных и закономерных связей между вещами и событиями во внешнем мире. «Мы видим далее, что причина и следствие суть понятия, имеющие значение лишь в применении к отдельному явлению, но что если рассматривать то же явление в его общей мировой связи, то эти два понятия соединяются и переходят в представление о всеобщем взаимодействии, в котором причина и следствие постоянно меняются местами, и то, что теперь или здесь является следствием, то станет там или тогда причиной и наоборот». [2]

Одним из наиболее ярких доказательств того, что в общем ходе явлений природы все вещи и события действительно связаны между собой закономерными соотношениями, служит широкое и плодотворное применение математического анализа при рассмотрении физических явлений, т.-е. основных явлений природы. Математика не есть область знания, стоящая независимо от внешнего мира. Математика, несомненно, отражает в себе свойства и взаимные связи разнообразных физических реальностей, так как она развилась из всестороннего опытного изучения вещей и явлений, объективно-реально существующих вне нашего сознания. Отбрасывая все второстепенное и абстрагируя основные закономерные соотношения между вещами и явлениями внешнего мира, математика пришла к представлению о функциональной зависимости, о функциях. Главное содержание высших отделов математики составляет именно учение о функциях. Таким образом, математический язык есть, вообще говоря, абстрагированный до последней степени способ описания закономерных процессов, происходящих в природе. Понятно поэтому, что математический анализ, трактующий различные функциональные зависимости в самой обобщенной форме, оказывается столь ценным при рассмотрении физических явлений. Ведь этот математический язык действительно соответствует функциональным соотношениям между вещами и явлениями природы, т. с. соответствует причинным связям и закономерностям внешнего мира.

---

[1] Ленин., Соч., т. XIII, стр. 128.

[2] Фридрих Энгельс. «Анти-Дюринг», стр. 15.

Необходимо, однако, иметь в виду, что при математическом обобщения и абстрагировании закономерностей, наблюдаемых в природе, нередко допускается разного рода экстраполирование, которое при всей его формальной безупречности может уводить нас за пределы физической пространственно-временной непрерывности и порождать представления, не имеющие прямого отношения к реальному миру физических явлений. На этой почве иногда возникают уклоны в сторону физического идеализма, связанные с приписыванием природе воображаемых свойств, например, бытия в многомерных пространствах. В других случаях подобное же приписывание природе воображаемых свойств основывается на идеалистической интерпретации совершенно правильных результатов математического анализа данных физического эксперимента, как это имеет место, например, в случае ошибочной трактовки соотношения неопределенности, которое якобы заставляет допустить существование мистических «вновь открытых свойств материи» (см. пункт 6-й настоящей статьи).

В непосредственной связи с этими «вновь открытыми свойствами материи» стоят попытки отрицания причинных связей в некоторых явлениях атомного масштаба. Исследователь-физик настолько прочно стоит на позициях интуитивного признания полного соответствия между объективной закономерностью событий, происходящих во внешнем мире, и Методами математического их описания, что, сталкиваясь с неопределенностью при математической трактовке микрофизических явлений, иногда делает неправильное заключение клонящееся к отрицанию причинных связей в явлениях этого рода. Сущность возникающей в подобных случаях ошибки в отношении изучаемой закономерности состоит в игнорировании «относительного характера наших, т.-е. человеческих, приблизительных отражений этой закономерности в тех или иных понятиях» (см. положение IX). Ясно, следовательно, что с материалистической точки зрения соотношение неопределенности надо понимать не как повод к отрицанию закона причинности при рассмотрении движений отдельного микрофизического объекта (например, электрона), а как простое указание на то, что в некоторых предельных случаях математический анализ данных опыта еще не в достаточной степени отражает закономерное протекание того или иного процесса. Однако неопределенности в математическом описании отдельных событий атомного масштаба, протекающих, конечно, столь же закономерно, как и явления макрокосмические, компенсируется значительно большей определенностью достигаемой методами статистической физики, которые приводят к менее искаженному отражению в нашем сознании общего хода явлений, происходящих во внешнем мире.

Итак, нет решительно никаких оснований к отрицанию принципа причинности в отношении явлений микрокосмического порядка и к приписыванию электронам какой-то «свободной воли», как это делалось и делается некоторыми физиками, придерживающимися идеалистических установок. Статистические закономерности, каковыми являются многие законы, формулированные физической наукой, так относятся к элементарным

81

причинным связям, которым подчиняются отдельные события (безразлично, в макромире или в микромире), как новые качественные характеристики всякой совокупности вообще относятся к элементарным свойствам отдельных слагаемых. При этом одно несомненно, а именно, что в объективно-реальном мире могут иметь место только такие события, каждое из которых находится в той или иной причинной зависимости от других событий. «Идея, будто познание может «создавать» всеобщие формы, заменять первичный хаос порядком и т. п., есть идея идеалистической философии. Мир есть закономерное движение материи, и наше познание, будучи, высшим продуктом природы, в состоянии только отражать эту закономерность».[1]

С проблемой причинности находится в тесной связи проблема случайности и необходимости. В этом отношении до настоящего времени существует немало недоразумений, отчасти основанных на недостаточной договоренности по поводу того, что именно мы называем случайностью. Здесь надлежит, прежде всего, констатировать, что, с материалистической точки зрения, является чистым абсурдом представление об абсолютной случайности, понимаемой как событие, абсолютно не подчиненное какой бы то ни было причинной связи с другими событиями, среди которых оно возникает. Речь может идти только об относительной случайности, представляющей собой событие, которое неизбежно возникает как результат некоторого ограниченного комплекса причинных связей, когда эти причинные связи удовлетворяют надлежащим пространственно-временным условиям.[2]

Всякое событие мы должны рассматривать в его общей мировой связи и как одно из звеньев всеобщего взаимодействия. Следовательно, и событие, называемое относительной случайностью, вообще говоря, должно быть рассматриваемо как необходимое на фоне всеобщей закономерности явлений природы. Остановимся, например, на случае падения метеора в данном месте земной поверхности. Для того чтобы рассматриваемое случайное событие произошло, т.-е. для того, Чтобы метеор упал именно в данном месте земной поверхности, требуется осуществление целого ряда обстоятельств. Земля должна встретиться в космическом пространстве с роем метеорной пыли. В то же время земля, вращающаяся вокруг своей оси, должна занимать определенное положение по отношению к направлению вектора: скорости той составной части метеорного роя, которая, вступив в область земной атмосферы, в конце концов, упадет в данном месте. Начальная масса метеора должна быть достаточно велика и т. д. и т. д. При наличии всех этих условий падение метеора в данном месте земной поверхности оказывается совершенно необходимым событием. Иными словами, относительная случайность необходима. Таким образом, нельзя разделять все со-

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII стр. 138.

[2] См. акад. В. Ф. Миткевич. Сборник «Основные физические воззрения», стр. 57. 1936. 2-е изд. (настоящий сборник, статья IV).

82

бытия на две резко обособленные категории: случайное и необходимое. Обе эти категории внутренне едины.

Касаясь метафизического противоположения случайности и необходимости, с одной стороны, и механического детерминизма, вообще отрицающего случайность, о другой стороны, Ф. Энгельс, между прочим, говорит:

«В противовес обоим этим взглядам выступает Гегель с неслыханными до того утверждениями, что случайное имеет основание, ибо оно случайно, но точно так же не имеет никакого основания, ибо оно случайно; что случайное необходимо, что необходимость сама определяет себя как случайность и что, с другой стороны, эта случайность есть скорее абсолютная необходимость (Logik, книга II,

Отдел: Действительность). Естествознание предпочло игнорировать эти положения как парадоксальную игру слов, как противоречащую себе самой бессмыслицу, закоснев теоретически в бессодержательности вольфовской метафизики, согласно которой нечто либо случайно, либо необходимо, но ни в коем случае ни то, ни другое одновременно, или в столь же бессодержательном механическом детерминизме, который на словах отрицает случайность в общем, чтобы на практике признать ее в каждом отдельном случае».[1]

Само собой разумеется, что Ф. Энгельс имеет в виду не абсолютную случайность, а именно относительную случайность.

Применительно к рассмотрению проблемы случайного и необходимого все возможные причинные связи можно разбить на две категории: причинные связи безусловны ей причинные связи условные.

Безусловная причинная связь между двумя событиями или обстоятельствами А и Б характеризуется тем, что возникновение А всегда и неизбежно влечет за собой возникновение Б, причём в данном случае А является безусловной причиной, а Б — безусловным следствием. Так, например, безусловною причинною связью характеризуется соотношение между двумя событиями или обстоятельствами в следующих случаях:

а) Протекание через раствор медного купороса некоторого количества электричества (причина А) и выделение на катоде соответствующего количества меди (следствие Б).

б) Прерывание цепи постоянного электрического тока (причина А) и прекращение тока (следствие Б).

в) Разрыв нити, на которой висит камень (причина А) и падение камня (следствие Б).

г) Адиабатическое сжатие газа (причина А) и повышение температуры газа (следствие Б).

д) Столкновение двух молекул газа (причина А) и изменение скоростей движения данных молекул (следствие. Б).

В рассмотренных примерах вероятность события Б при наличии события А равна 100%. Именно этой стопроцентной вероятностью

---

[1] Ф. Энгельс, «Диалектика природы», стр. 109.

некоторого события определяется его квалификация в качестве события необходимого.

Условная причинная связь между двумя событиями или обстоятельствами А и Б характеризуется тем, что возникновение А только тогда сопровождается возникновением Б, когда имеются в наличии и другие события или обстоятельства, притом удовлетворяющие надлежащим пространственно-временным условиям: В рассматриваемой обстановке А является условною причиною, а Б — условным следствием.

Ввиду того, что в природе не существует абсолютно изолированных систем физических реальностей, но все мироздание представляет собой единое целое, части которого прямо или косвенно взаимно связаны между собой, мы весьма часто встречаемся именно с условными причинными связями. Так как рассматриваемые обстоятельства, причина А и следствие Б, всегда входят в состав более или менее сложного комплекса обстоятельств, вообще говоря, взаимно влияющих одно на другое, то, по существу, речь может идти только о степени вероятности следствия Б при наличии данной причины А. В этом смысле безусловная причинная связь является тем предельным случаем условных связей, который характеризуется вероятностью следствия Б, равной 100%, как это было указано выше.

В качестве примеров более или менее резко выраженной условности причинных связей можно указать на следующие:

а) Возможность наблюдения солнечного затмения в некотором, наперед заданном месте является следствием (Б) надлежащего относительного расположения данной точки земной поверхности, Солнца и Луны (причина А), при условии, однако, если в течение соответствующего промежутка времени погода достаточно благоприятна, т.-е. если отсутствует облачность.

б) Камень падает с горы (следствие Б) под влиянием земного поля тяготения (причина А), но это может случиться только тогда, когда что-либо нарушает устойчивое равновесие камня вверху горы.

В этом отношении возможны самые разнообразные дополнительные причины, как, например откалывание камня от отвесной скалы под влиянием атмосферных условий, импульс со стороны другого падающего камня, землетрясение и т. п.
в) В данном месте прорастает некоторое растение, например одуванчик (следствие Б), но для этого здесь должно упасть на поверхность почвы семя одуванчика (причина А). Однако все это может произойти только при условии, если ветер принесет в данное место семя одуванчика, отделившееся от материнского растения, иногда очень отдаленного. Это в свою очередь обусловлено наличием ветра надлежащего направления и силы. Кроме того, необходимо, чтобы такой ветер дул как раз во время созревания семени и отделения его от материнского растения.
г) Некоторая газовая молекула после соударения (причина А) с другой молекулой приобретает определенную наперед заданную скорость (следствие Б). Для того чтобы это случилось, должен иметь
84
место ряд дополнительных обстоятельств. Начальные скорости обеих молекул не могут быть какие угодно, а должны удовлетворять надлежащим условиям. В соответствии с начальными скоростями молекул их угол встречи должен быть тот или иной. Наконец, молекулы должны двигаться именно так, чтобы встретились, т.-е. чтобы могли оказаться в один и тот же момент времени в месте пересечения их траекторий. Все указанные дополнительные обстоятельства в свою очередь необходимо определяются предшествовавшими столкновениями обеих данных молекул с другими молекулами и т. д. и т. д.
В вышерассмотренных примерах условных причинных связей событие Б происходит не всякий раз, когда возникает событие А, но только в некоторых случаях, в зависимости от наличия других событий или обстоятельств. Степень соподчиненности следствия Б причине А определяется вероятностью события Б при данной общей обстановке. Условность причинной связи выражается именно в том, что эта вероятность всегда меньше 100%. Событие или обстоятельство, вероятность которого при данной обстановке меньше 100%, мы и называем случайностью.
Как мы указывали выше, ввиду внутреннего единства всего мироздания в целом, конечно, не может быть и речи об абсолютной случайности, т.-е. о событии, абсолютно не подчиненном какой бы то ни было причинной связи с другими событиями, среди которых оно возникает. Случайность же относительная, обычно называемая просто случайностью, представляет собой не что иное, как событие, подчиненное условной причиной связи с другими событиями.
Рассматривая некоторое событие как случайность, характеризуемую известной степенью вероятности (меньшей 100%), мы всегда должны иметь в виду более или менее сложный, но все же ограниченный комплекс обстоятельств, играющих роль общей обстановки, в которой возникает данное событие или явление природы. В области ограниченного комплекса обстоятельств случайность тех или иных событий есть нечто объективно-реальное. В то же время каждое случайное в указанном смысле событие, при надлежащей общей обстановке, необходимо возникает в качестве звена безусловной причинной связи с каким-то определенным предшествующим событием (вероятность 100%). Так, молекула газа, двигающаяся с некоторою скоростью, обязательно приобретает новую, наперед заданную скорость после соударения с другой молекулой, надлежащим образом двигающейся. Такая случайность, как отсутствие солнечной погоды, есть безусловное следствие облачности и т. д. Вместе с тем безусловная необходимость всякого события вытекает и из общей закономерности того, что совершается в природе и что в каждом частном случае вполне определяется бесконечной совокупностью разнообразных причинных зависимостей. Иными словами, всякая случайность необходима.
Однако в некотором определенном и четко ограниченном комплексе обстоятельств данное событие является лишь более или менее
85
вероятным, т.-е. случайным. Та или иная погода в данный момент, конечно, представляет собой необходимый результат бесконечной совокупности предшествовавших обстоятельств, влиявших на

атмосферные условия на земном шаре, Но в ограниченном комплексе атмосферных условий, имевших место, например, в Европе в течение ряда дней, солнечная погода в Москве в один из этих дней есть лишь относительная случайность, характеризуемая соответствующей вероятностью. Вообще всякое событие, обычно понимаемое нами как совершенно необходимое, на фоне ограниченного и в то же время достаточно сложного комплекса обстоятельств должно быть рассматриваемо как относительная случайность.

Итак, всякое событие и необходимо и случайно. Оно необходимо, во-первых, как часть минимально ограниченного комплекса событий (безусловная причина и безусловное следствие), и, во-вторых, как часть бесконечного комплекса событий, закономерно совершающихся в природе и взаимно связанных между собою. Оно случайно как часть некоторого более или менее сложного, но определенно ограниченного комплекса событий. В этом заключается смысл парадоксального на первый взгляд утверждения, что случайное необходимо, а необходимое случайно.

Количественное различие вероятностей случайного и необходимого (меньше 100% и 100%) не есть нечто воображаемое, а представляет собой действительное различие специфических характеристик событий и обстоятельств в зависимости от их сочетаний и совокупностей. Все это является основанием для того, чтобы признать качественное различие случайного и необходимого. Таким образом, понятия случайного и необходимого отображают в себе объективно-реальные соотношения между вещами и явлениями природы,

Неполноценность механического принципа причинности, ошибочно понимаемого иногда в качестве якобы всеобъемлющей и исчерпывающей формулировки закономерностей, Которым подчиняются явления природы, заключается именно в игнорировании качественных сторон этих закономерностей и в отрицании всякой случайности вообще.

Представление о пространственных Перемещениях разного рода физических реальностей (или их частей) как основе какого бы то ни было явления природы и, в частности, развитие этой идеи применительно к наиболее изученным механическим движениям, т.-е. перемещениям гравитационной материи, привело к такому представлению о явлениях природы, согласно которому достаточно знать начальные условия движения какой-либо системы, чтобы можно было определить движение этой системы в дальнейшем. В целом ряде случаев, между прочим, в области движения небесных тел, были достигнуты блестящие результаты на базе механического принципа причинности, и это служило подтверждением таких совершенно верных положений механического материализма, как необходимость всего совершающегося в природе или обусловленная ею невозможность абсолютной случайности в явлениях природы, Вместе с тем, однако, 86

недостаточность механического принципа причинности в приложении к всестороннему рассмотрению процессов, протекающих во внешнем мире, обнаружилась в отрицании даже относительной случайности, а также в ряде затруднений, с которыми наука столкнулась при описании более сложных явлений, например явлений электромагнитного характера, в особенности микрофизических явлений.

Более высокую ступень в понимании общей закономерности всего происходящего в природе представляет диалектико-материалистическая трактовка принципа причинности. С этой точки зрения, в бесконечном разнообразии взаимодействий между событиями и обстоятельствами имеют место и причинные связи, качественно отличающиеся от чисто механических причинных связей. Сказанное полностью относится, между прочим, к области электромагнитных явлений. Всеобщий принцип причинности охватывает собой не только закономерности, которым подчиняются механические движения, но и специфические закономерности, характеризующие различные немеханические области явлений природы (электромагнетизм, оптика, термодинамические процессы, внутриатомные явления и т. д.).

Из всего вышеизложенного с очевидностью вытекает, что всеобщий принцип причинности не отвергает механического принципа причинности, а заключает его в себе. Оба они находятся, таким образом, в теснейшей связи друг с другом. В этом отношении имеется полное соответствие с утверждением, что всякий физический процесс «заключает в себе механическое движение и

перемещение больших или мельчайших частей материи» (см. положение VIII), а также может быть проведена аналогия с тем, что признание специфических качеств всякой физической реальности не находится в противоречии с основным положением, согласно которому она «представляет собою некоторую форму движущейся материи» (см. положение V).

Итак, всеобщий принцип причинности качественно отличается от механического принципа причинности. Всякое уклонение от диалектического понимания принципа причинности ведет нас к механицизму.

9. Положение X содержит формулировку закона сохранения энергии. Характеризуя собой объективно-реальную активность, вечно присущую движущейся материи, энергия с количественной стороны является мерой этой активности. Подобно тому, как материя не мыслима без движения, точно так же была бы ошибочна мысль, «будто «энергия» есть нечто внешнее для материи, нечто привитое ей».[1] Таким образом, идея об энергии самой по себе, не связанной с материей, столь же абсурдна, как и идея о движении, не ассоциируемом с тем, что движется. Представления об энергии, движении и материи внутренне, теснейшим образом связаны между собой и неотделимы одно от другого. Попытки рассматривать энергию в качестве самостоятельной сущности, лежащей в основе всего совершающегося в природе, ведут к антиматериалистическим установкам.

Формы движения и соответственно этому виды энергии, с кото-

[1] Ф. Энгельс. «Диалектика природы», стр.138.

рыми мы встречаемся в физических явлениях, бывают весьма разнообразны. В природе мы везде имеем дело с превращениями одной формы движения в другую, одного вида энергии в другой. С такого рода превращениями связано понятие работы в общефизическом смысле, так как «работа это — изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны». [1]

«Превращение энергии рассматривается естествознанием, как объективный процесс, независимый от сознания человека и от опыта человечества, т.-е. рассматривается материалистически». [2] При этом существенно то, что энергия никогда не исчезает, не превращается в ничто и никогда не возникает из ничего. Ока может только переходить из одного вида в другой, в строго эквивалентных соотношениях, или пространственно перемещаться в связи с передачей движения из одного места в другое, чему обычно сопутствуют и различные преобразования форм этого движения. Таково содержание закона сохранения энергии.

Как известно, очень многие законы физики относительны и, будучи, в ряде случаев выражением статистических закономерностей природы, представляют собой лишь приблизительно верное отображение в голове человека реальных соотношений между вещами и событиями. Совершенно особенное положение занимает закон сохранения энергии, который является основным положением, характеризующим количественную сторону важнейших закономерностей в природе. Ф. Энгельс следующим образом формулировал этот закон; «Любая форма движения, оказывается, способна и должна превращаться в любую иную форму движения». При этом он добавляет: «В этой форме закон достиг своего последнего выражения. Благодаря новым открытиям мы можем найти новые доказательства его, придать ему новое, более богатое содержание. Но к самому закону, как он здесь выражен, мы не можем прибавить более ничего. В своей всеобщности, в которой одинаково всеобщи форма и содержание, он неспособен к дальнейшему расширению: он — абсолютный закон природы». [3]

Итак, закон сохранения энергии, бывший предметом подчас интуитивных исканий на всем протяжении истории физической науки и осознанный, конечно, лишь в результате обобщения огромного количества опытных данных, должен рассматриваться как утверждение, беспредельно приближающееся к действительному содержанию того, что совершается в природе.

Соотношение эквивалентности массы и энергии (заключающее в себе квадрат скорости некоторого движения) является весьма важным достижением современной физики и обогатило закон сохранения энергии новым содержанием. В связи с этим в положении X сделано соответствующее дополнение.

Самый закон стал, таким образом, еще более всеохватывающим и приобрел еще больший смысл в качестве

[1] Ф. Энгельс, «диалектика природы», стр. 151.
[2] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 222.
[3] Ф. Энгельс. «Диалектика природы», стр. 102.

88

основного закона природы, выражающего собою принципиальную закономерность исключительного значения.

В последнее время рассмотрение микрофизических явлений дало повод некоторым ученым, как за границей, так и в СССР, утверждать, будто бы закон сохранения энергии верен лишь статистически, подобно многим иным законам физики. Высказывалось предположение, что этот закон теряет свою силу в применении к индивидуальным событиям атомного масштаба. Эти уклоны в сторону физического идеализма внутренне связаны с ошибочным толкованием соотношения неопределенности и с утверждением ряда физиков, будто бы в области микрофизических явлений открыты новые свойства материи, заключающиеся в том, что ее элементы могут на время исчезать из трехмерного физического пространства. Правда, новейшие исследования достаточно убедительно показали, что закон сохранения энергии остается справедливым и в явлениях атомного масштаба. Однако всеобщее признание этого закона сделается безусловно необходимым фоном физического мышления тогда и только тогда, когда основные установки материалистического миропонимания станут полностью и безоговорочно разделяться представителями физической науки.

10. Остановимся на внутренней связи положений IX и X, выражающих принцип причинности и закон сохранения энергии. По существу, закономерность в области энергетических соотношений между вещами и событиями в природе представляет собой лишь важнейший случай в ряду разнообразных закономерностей, характеризующих единство мироздания и обобщаемых нашим сознанием в формулировке всеобщего принципа причинности.

Все явления природы, вообще говоря, сопровождаются процессами обмена энергии и превращения ее из одного вида в другой. Не существует таких явлений природы, которые не были бы как-либо связаны! с энергетическими процессами. При этом энергия в том или ином виде претерпевает пространственные перемещения и перераспределения, переходя из одних частей пространства в другие либо вместе с соответствующими физическими реальностями, играющими роль носителей энергии, либо путем иных форм энергетического обмена между различными физическими реальностями. Причинные связи, с которыми мы всегда и неизменно встречаемся в области физических явлений, не могут быть изучаемы при полном игнорировании энергетической стороны этих связей. Наоборот, только принимая во внимание степень и форму участия энергетических процессов в самом осуществлении причинных зависимостей в области физических явлений, мы можем, вообще говоря, углубиться при рассмотрении объективного содержания понятий «причина» и «следствие» применительно к этим явлениям.

Можно утверждать, что всегда существует закономерное энергетическое соотношение между событием-причиной и событием-следствием. При этом в ряде случаев физический процесс, рассматриваемый как событие-следствие, происходит полностью за счет энергии,

89

притекающей из той части пространства, где имеет место событие-причина. Так, например тепловые процессы на солнце являются причиной многих физических процессов на земле, происходящих вследствие поглощения ее атмосферой и поверхностью лучистой энергии солнца. Внешняя работа расширяющегося газа совершается вследствие того, что этот газ обладает внутренним запасом энергии, причем величина внешней работы в точности равна убыли данного запаса энергии. Разного рода приемники электрической энергии (электродвигатели, источники света, нагревательные устройства) функционируют по причине того, что на электрической станции генерируется электрическая энергия, в которую преобразуется работа первичных механических двигателей

(паровых или гидравлических) и т. п. В других случаях событие-причина играет роль своего рода спускного механизма, действие которого обусловливает возникновение события-следствия. При этом, хотя возникающие вследствие некоторой причины физические процессы протекают, с точки зрения энергетической, совершенно самостоятельно и независимо от какого-либо притока энергии из того места, где произошло событие-причина, однако для надлежащей эффективности некоторого события-причины всегда оказывается необходимым, чтобы количество энергии, которое расходуется для приведения в действие «спускного механизма», было в данных условиях не меньше какого-либо определенного предела. Так обстоит дело в случае спуска курка у заряженного ружья, в случае элементарного фотоэффекта, когда от атома вещества отщепляется электрон под влиянием импульса со стороны достаточного по интенсивности кванта лучистой энергии, в случае ионизации газа коллизией и т. п.

Во всяком, случае, каковы бы ни были те или иные причинные связи, как в смысле природы рассматриваемых физических явлений, так и в отношении общей обстановки, при которой эти явления происходят, осуществление этих причинных зависимостей всегда бывает внутренне связано с выполнением соответствующих условий энергетического характера.

Итак, принцип причинности и закон сохранения энергии по своей сущности тесно переплетаются друг с другом и выражают собой единую всеобщую закономерность всего того, что совершается в природе. Отделять их один от другого, как это иногда теперь делается представителями физической науки, утверждать, например, что в области микрофизических явлений эти два основных положения могут не соблюдаться одновременно, — это значит совершать большую ошибку в отношении основных установок материализма. Нельзя, признавая справедливость закона сохранения энергии в отдельных событиях атомного масштаба, допускать в отношении этих событий какие-либо изъятия из всеобщего принципа причинности. Поступать так, значит вступать на путь физического идеализма.

11. Всякого рода причинные связи, о которых мы говорили выше, обнаруживаются в бесконечном разнообразии явлений природы при взаимодействии физических реальностей, участвующих в этих явле-

иях. Любое простейшее явление природы не может протекать иначе, как в форме взаимодействия минимум двух физических реальностей. Вопрос о том, как именно и при соблюдении каких именно главнейших условий возможно осуществление подобных взаимодействий, играет важную роль в смысле образования наших основных физических представлений. Дело в том, что правильное с материалистической точки зрения решение указанного вопроса требует с нашей стороны совершенно четкого и определенного отношения к рассмотренным выше десяти положениям вообще. При рассмотрении вопроса о необходимых условиях и способах осуществления всякого физического взаимодействия внимание фиксируется на всех основных моментах нашего миросозерцания. Особенное значение имеют наши принципиальные установки, касающиеся трехмерного физического пространства, принципа причинности и закона сохранения энергии (положение IV, IX и X).

Как уже было отмечено выше (пункт 8-й настоящей статьи), всеобщий принцип причинности охватывает собой и механический принцип причинности. В связи с этим никакая физическая реальность не может испытывать каких бы то ни было влияний извне иначе, как по причине непосредственных элементарных воздействий на нее со стороны тех частей вечно движущейся материи, которые вступают в прямой контакт с этой физической реальностью. С материалистической точки зрения, взаимодействие каких-либо двух физических реальностей, находящихся на произвольном расстоянии одна от другой, сколь угодно большом или сколь угодно малом, может осуществляться только по причине последовательного распространения элементарных воздействий от одной части движущейся материи к другой сквозь трехмерное пространство, в котором находятся рассматриваемые физические реальности, или же по причине соответствующего пространственного перемещения некоторой третьей физической реальности, которая играет роль посредника в отношении переноса энергии и количества движения от одной из взаимодействующих физических

реальностей к другой. Предположение, будто в явлениях природы взаимодействия могут осуществляться каким-либо иным способом, выводит нас за пределы трехмерного физического пространства и повергает в область мистики.[1]

В целом ряде случаев взаимодействия физических реальностей мы знаем только реальный факт этого взаимодействия, но еще недостаточно осведомлены о том, как именно и через что передается рассматриваемое действие. В таких случаях, при общем описании явлений природы и при их математическом анализе, мы обычно вводим понятие о «силе», имея в виду интегральное действие неизвестных или трудно учитываемых причин. При этом мы оставляем в стороне вопрос об исчерпывающем описании обстановки, в которой совершается то или иное взаимодействие, и о самом механизме этого;

---

[1] См. акад. В. Ф. Миткевич. Сборник «Основные физические воззрения», стр. 48—51. 1936. 2-е изд. (настоящий сборник, статья III).

взаимодействия. По этому поводу поучительно привести следующие слова Ф. Энгельса:

«Представление о силе заимствовано, как это признается всеми (начиная от Гегеля и кончая Гельмгольцем), из проявлений деятельности человеческого организма по отношению к окружающей его среде. Мы говорим о мускульной силе, о поднимающей силе рук, о прыгательной силе ног, о пищеварительной силе желудка и кишечного тракта, о силе ощущения нервов, о секреторной силе желез и т. д. Иными словами, чтобы избавиться от необходимости указать реальную причину, изменения, вызванного какой-нибудь функцией нашего организма, мы сочиняем некоторую фиктивную причину, соответствующую этому изменению, и называем ее силой. Мы переносим затем этот удобный метод и во внешний мир и таким образом сочиняем столько же сил, сколько существует различных явлений». [1]

Само собой разумеется, что рассмотренный выше, единственно возможный способ осуществления физических взаимодействий решительно отвергает мысль о каких-либо мгновенных взаимодействиях между удаленными одна от другой физическими реальностями и допускает только такие «действия на расстоянии», которые распространяются с (некоторой конечной скоростью. Все это полностью соответствует тому, что дает нам опыт в отношении реальных физических процессов. Вместе с тем опыт показывает, что энергетический обмен между взаимодействующими физическими реальностями всегда совершается в пределах объективно-реального трехмерного пространства, как это и следует из рассмотренной общей схемы всякого физического взаимодействия.

Таким образом, вопрос об основных условиях, при которых могут осуществляться какие бы то ни было физические взаимодействия, тесно связан с целым комплексом наших принципиальных, представлений *о* природе. Та или иная точка зрения по указанному вопросу полностью выявляет наши научно-философские установки и предопределяет .общий фон физического мышления (материалистический или идеалистический). Именно поэтому представители физической науки, уклоняющиеся в сторону идеализма, систематически возражают против самой постановки данного вопроса и делают попытки отрицать в нем какой-либо физический смысл. Именно поэтому такой весьма актуальный до настоящего времени вопрос с успехом может занять центральное место в борьбе против идеалистических установок в области физической науки. Ведь он, по существу, затрагивает все основные позиции материалистического миропонимания и в то же время касается совершенно конкретного момента, имеющего принципиальное значение для всех физических явлений. [2]

---

[1] Ф. Энгельс. «Диалектика природы», стр. 138.

[2] Ведя в течение ряда лет непрерывную борьбу против идеалистических установок в физике, автор настоящей статьи счел весьма целесообразным сформулировать специальный вопрос, касающийся взаимодействия двух физических реальностей или, вообще говоря, двух физических систем. Вопросу этому придана самая общая форма, для того чтобы не дать повода уклоняться от пря-

92

12. «Современная физика лежит в родах. Она рожает диалектический материализм. Роды болезненные». [1] Так образно выразился В. И. Ленин в 1908 году. К сожалению, приходится констатировать что эти болезненные роды затянулись до наших дней. Хотя установки диалектического материализма приобретают все больше и больше сторонников среди физиков, как в СССР, так и за границей, однако волна идеализма, поднявшаяся за последние годы, требует еще преодоления, для того, чтобы процесс рождения новой физики, прочно стоящей на базе единственно правильного миросозерцания, можно было считать в общем закончившимся. На представителях советской физической науки лежит ответственная обязанность быть в передовых рядах в борьбе за диалектический материализм, в борьбе против фетишизма и идеалистических уклонов.

«Наука потому и называется наукой, что она не признает фетишей, не боится поднять руку на отживающее, старое и чутко прислушивается к голосу опыта, практики». [2] Эти руководящие слова И. В. Сталина должны служить маяком для тех, кто стремится вперед по пути познания природы, по пути научного творчества. Только строгий анализ наших основных физических воззрений, только беспощадное изобличение ложных установок, не могущих соответствовать объективно-реальному содержанию внешнего мира, позволят науке отбросить ряд фетишей, которые засоряют физическое мышление, И этого можно будет достигнуть только при чутком отношении «к голосу опыта, практики». Иными словами, в процессе переоценки наших представлений о природе мы должны отчетливо осознавать исключительное значение тех указаний, которые нам дает непосредственный контакт с практическими приложениями достижений физической науки, и на каждом шагу внимательно проверять степень соответствия наших принципиальных физических установок с тем, что является самым существенный в функционировании того или иного чисто технического устройства. Связь науки с техникой, отображаемая в нашем сознании как внутреннее единство теории и практики,— вот что всегда оплодотворяет эти две стороны деятельности человека и что, в конце концов, несомненно, приведет к полному торжеству диалектического материализма в области физического мышления.

мого и четкого ответа путем всякого рода рассуждений о деталях, имеющих в известном смысле второстепенное значение (см. статьи II, III, VIII, XII, XV, XVI, XVII, XIX и XX настоящего сборника). Автор дал исчерпывающее доказательство правильности и законности постановки подобного вопроса, заостряющего внимание на весьма существенных сторонах нашего миросозерцания и прямо или косвенно затрагивающего все положения I-X. Это не есть случайный вопрос. Постановка его заставляет нас внимательно и всесторонне проанализировать весь комплекс основных физических воззрений.

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 256.

[2] И. В. Сталин. Речь на Первом всесоюзном совещании стахановцев, стр. 22.

93

VII

ЗНАЧЕНИЕ КНИГИ ЛЕНИНА «МАТЕРИАЛИЗМ И ЭМПИРИОКРИТИЦИЗМ» В СОВРЕМЕННОЙ БОРЬБЕ С ИДЕАЛИЗМОМ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ [1]

30 лет тому назад в своей гениальной книге «Материализм я эмпириокритицизм» Ленин следующими словами резюмировал все сказанное им по поводу тяжелого положения, создавшегося в науке о природе при освоении вновь открываемых фактов:

«Суть кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т.-е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом». [2]

Этот чрезвычайно меткий диагноз болезненного состояния физической мысли полностью сохраняет свою силу и в наши дни. Кризис физики еще не изжит. Именно теперь, когда физическая мысль особенно устремилась в область явлений атомного масштаба, когда наука обогатилась целым рядом новейших открытий, касающихся строения вещества, и теоретическая физика пришла к чрезвычайно

важным результатам, — именно теперь кризис в физике приобрел большую остроту. В связи с этим глубокие мысли, высказанные Лениным, имеют особо важное значение в настоящее время. Волна идеализма, поднявшаяся в зарубежных странах, находит отклики и в СССР. Данный Лениным великий синтез основных установок материалистического миропонимания является мощным оружием в современной борьбе с идеализмом в физике, ведущей науке о природе.

Два мировоззрения — материалистическое и идеалистическое — борются на всем протяжении истории естествознания. Как всем хорошо известно, антагонизм этих двух направлений в миропонимании сводится, по существу, к исходным моментам. Именно: материализм исходит из признания объективно-реального существования вещей и предметов вне нашего сознания и совершенно независимо от нашего сознания; идеализм же со всеми его оттенками и разновидностями кладет в основу миропонимания идеи, т.-е. продукт психической дея-

[1] Журнал «Под знаменем марксизма», 1938, № 12, стр. 18—26.

[2] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 211.

тельности человеческого мозга, и считает чем-то вторичным, производным те вещи и предметы, которые якобы лишь кажутся существующими независимо от нашего сознания.

Ленин исчерпывающим анализом вскрыл реакционный характер идеалистических течений в науке о природе и показал, в чем заключается отрицательное общественное значение этих течений. Он выявил, каким образом сторонники идеалистического мировоззрения стремятся использовать каждое открытие в области естествознания для борьбы с материализмом, который в своем победном шествии все больше и больше раскрепощает человеческую мысль от всякого рода мистики и последовательно приближает наше понимание явлений природы ко все большему соответствию с тем, что происходит в действительности. Как это ярко и лаконично отмечено в «Курсе истории ВКП(б)», «книга Ленина является... защитой теоретических основ марксизма — диалектического и исторического материализма — и материалистическим обобщением всего важного и существенного из того, что приобретено наукой и, прежде всего, естествознанием за целый исторический период, за период от смерти Энгельса до появления в свет книги Ленина «Материализм и эмпириокритицизм». [1]

Именно этот период, конец XIX и самое начало XX в., ознаменовался рядом великих открытий в области физики. Старое, сложившееся веками, представление о том, что атом есть последняя ступень делимости вещества, потерпело крах. Было открыто много новых фактов, неопровержимо свидетельствующих о том, что атом в действительности представляет собою очень сложное образование, в состав которого входят более мелкие материальные части. Выяснилось, что эти составные части атома по своим свойствам сильно отличаются от обычного вещества. Самым замечательным открытием науки в отношении строения атома является то, что в состав всех без исключения атомов, образующих тела природы, входит положительное и отрицательное электричество. Атом, однако, в обычном своем состоянии кажется совершенно ненаэлектризованным, так как он содержит одинаковое количество электричества обоих знаков. Замечательно еще то, что все атомы построены из одних и тех же простейших составных частей. Атомы различаются между собой количеством этих простейших частей и их общим расположением в том постоянном движении, в котором они пребывают и которое до известной степени подобно движению небесных тел (планет) вокруг центрального тела (Солнца).

Таким образом, все известные до того атомы разнообразных химически простых тел внезапно предстали перед взором исследователя природы в виде сложных микромиров электромагнитного характера. Особенное внимание вначале было уделено входящим в состав всех атомов элементарным зарядам отрицательного электричества, обычно называемым электронами. Оказалось, что электрон обладает наименьшим известным в природе электрическим зарядом и

[1] «Краткий курс истории ВКП(б)», стр. 98.

приблизительно в 1840 раз легче самого легкого атома, именно — атома водорода. Стало очевидным, что химическое сродство имеет в своей основе электрические процессы. Открытие радия и других радиоактивных элементов, атомы которых сами собой претерпевают непрерывный распад, сопровождающийся выделением свободных электронов и образованием атомов гелия, привело к полному крушению старых представлений о неизменности атомов и химических простых тел. Накопился ряд фактов, свидетельствующих о возможности превращения химических элементов друг в друга. Вместе с тем обнаружились явления, казалось бы, не укладывавшиеся в рамки таких незыблемых законов природы, как закон сохранения материи и закон сохранения энергии. В процессе внутриатомных преобразований в радиоактивных телах с несомненностью было установлено исчезновение некоторой доли массы материальных частей, из которых состоит атом, и появление эквивалентного количества энергии.

Все перечисленные открытия потрясли до основания устои старых физических представлений. Ленин по этому поводу говорит: «Неразрушимые и неразложимые элементы химии, число которых продолжает все возрастать точно в насмешку над единством мира, оказываются разрушаемыми и разложимыми». [1] Исчезает масса, возникает энергия, якобы нарушается принцип причинности и т. д. и т. д.

Основные представления физической науки, сложившиеся ко времени указанных открытий в весьма определенной форме и, казалось бы, совершенно окончательно, потребовали пересмотра. До этих открытий верили в чисто механическое объяснение природы. Считалось установленным, что физика есть лишь более сложная механика, именно — молекулярная механика. Расхождение было только в вопросе о приемах сведения физики к механике, о деталях механизма. После этих открытий зрелище, которое представляла физическая наука, оказалось совершенно обратным: крайние разногласия сменили прежнее единодушие, и притом разногласие не в деталях, а в основных и руководящих идеях.

Сторонники идеализма всех оттенков (махисты и т. п.) не замедлили воспользоваться вновь открытыми фактами для ожесточенной атаки против основ материалистического мировоззрения. Был провозглашен лозунг «Материя исчезает».

В своей книге «Материализм и эмпириокритицизм» Ленин подверг сокрушительной критике все попытки идеалистически трактовать явления природы, разоблачил принципиальную ошибочность подобной трактовки; и с исчерпывающей ясностью показал, что все открываемое нам через изучение природы не только не противоречит материалистической точке зрения, но, наоборот, гармонично укладывается в рамки материалистических представлений о природе и что эти представления находят себе лишь подтверждение в каждом новом открытии, непрерывно углубляясь по мере развития естествознания.

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 205.

96

Наука о природе, по существу, не может не быть материалистической. Всякое соприкосновение человека с внешним миром, непреложность того, что вещи и предметы внешнего мира никакими усилиями нашего сознания не могут быть устранены из обстановки физического эксперимента, и, наконец, повседневный опыт, свидетельствующий о необходимости так или иначе согласовывать деятельность человека с наличием этих вещей и предметов, — все это приводит нас к представлению об объективной реальности вещей и предметов внешнего мира. То, что лежит в основе этих вещей и предметов, да называем материей. Таким образом «понятие материи... не означает гносеологически ничего иного, кроме как: объективная реальность, существующая независимо от человеческого сознания и отображаемая им». [1]

С представлением о материи неразрывно связано представление о вечном ее движении. Ленин говорит: «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и да времени».[3] Понятия материи и движения неотделимы одно от другого. Как не существует движения без того, что движется, т.-е. без материи, так не существует и материи

без движения. Материя пребывает в вечном движении, и эта постоянная активность материи проявляется в виде энергии, которая так же, как и движение, неотделима от материи.

Что касается пространства и времени, то Ленин неоднократно и настойчиво указывает, что «пространство и время—не простые формы явлений, а объективно-реальные формы бытия». [3] Ленин напоминает следующие слова Энгельса:

«Основные формы всякого бытия... суть пространство и время; бытие вне времени есть такая же величайшая бессмыслица, как бытие вне (пространства».[4]

Сущность общей материалистической установки Ленин формулирует в следующих словах: «...материя, природа, бытие, физическое есть первичное, а дух, сознание, ощущение, психическое — вторичное». [5] С материалистической точки зрения, наше сознание не есть нечто самодовлеющее, существующее само по себе и не зависимое от материи. Ленин указывает: «Ощущение, мысль, сознание есть высший продукт особым образом организованной материи». [6]

Эти основы материалистического миропонимания теснейшим образом связаны с диалектическим методом познания явлений природы, которые рассматриваются не как нечто окончательно установившееся, а как нечто вечно движущееся, изменяющееся и развивающееся. С диалектической точки зрения, развитие природы в целом есть результат развития противоречий в природе, результат взаимодей-

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 214.
[2] Там же, стр. 144.
[3] Там же, стр. 144.
[4] Там же, стр. 145.
[5] Там же, стр. 120.
[6] Там же, стр. 45.

ствия противоположных сил в природе. «Развитие есть «борьба» противоположностей». [1] Вместе с тем непрерывно возникающие совокупности различных вещей и обстоятельств приводят к появлению новых качеств, характеризующих эти вновь создавшиеся совокупности. Диалектическое развитие надо рассматривать как непрекращающийся переход от количественных изменений к качественным изменениям. И в бесконечном разнообразии вещей и явлений природы, взаимосвязанных и непрерывно влияющих друг на друга, мы можем встречаться только с бесконечным же разнообразием совокупностей этих вещей и явлений.

«Поэтому диалектический метод считает, что процесс развития следует понимать не как движение по кругу, не как простое повторение пройденного, а как движение поступательное, как движение по восходящей линии, как переход от старого качественного состояния к новому качественному состоянию, как развитие от простого к сложному, от низшего к высшему». [2]

Проблема причинности занимает в современной физике одно из главных мест. Разногласия по этому поводу чрезвычайно выпукло отражают борьбу двух мировоззрений — материалистического и идеалистического. Ленин на страницах своей книги «Материализм и эмпириокритицизм» разоблачил неправильные, идеалистические установки по вопросу о причинности. В основе рассмотрения физических явлений должно лежать безоговорочное «признание объективной закономерности, причинности, необходимости в природе... наряду с подчеркиванием относительного характера наших, т.-е. человеческих, приблизительных отражений этой закономерности в тех или иных понятиях». [3] Ленин сверх того указывает: «Признание объективной закономерности природы и приблизительно верного отражения этой закономерности в голове человека есть материализм».[4]

Все наши представления о вещах внешнего мира являются отражениями этих вещей в нашем сознании, отражениями приблизительными, непрерывно совершенствующимися по мере развития науки и постепенно приближающимися к наибольшему соответствию с тем, что происходит в действительности.

Закон сохранения энергии, в котором мы должны видеть одно из проявлений универсальной закономерности всего происходящего в природе, Ленин также относит к числу основных положений материализма.[5] Между прочим, Ленин говорит:

«Превращение энергии рассматривается естествознанием, как объективный процесс, независимый от сознания человека и от опыта человечества, т.-е. рассматривается материалистически». [6]

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 301.
[2] «Краткий курс истории ВКП(б)», стр. 102.
[3] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 128.
[4] Там же, стр. 127.
[5] Там же, стр. 272 (примечание).
[6] Там же, стр. 222.

98

На целом ряде примеров Ленин показал, к каким извращениям физической мысли приводят отступления от основных установок материализма и как подобные отступления уводят исследователя на путь физического идеализма. В особенности резко обнаруживаются патологические уклоны физической мысли в различных попытках идеалистической трактовки новых открытий.

Как указано было выше, открытие непостоянства массы в процессе внутриатомных преобразований дало противникам материализма повод говорить об исчезновении материи. Подвергнув обстоятельному разбору подобного рода высказывания, основанные на ошибочном отождествлении таких понятий, как масса и материя, Ленин в следующих замечательных словах разъясняет истинное значение упомянутого открытия:

«Материя исчезает» — это значит исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными (непроницаемость, инерция, масса и т. п.) и которые теперь обнаруживаются, как относительные, присущие только некоторым состояниям материи. Ибо единственное «свойство» материи, с признанием которого связан философский материализм, есть свойство быть объективной реальностью, существовать вне нашего сознания».[1]

С точки зрения диалектического материализма, вечно движущаяся материя неисчерпаема в своих проявлениях. Ленин определенно указывает :

«Электрон так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна, но она бесконечно существует, и вот это-то единственно категорическое, единственно безусловное признание ее существования вне сознания и ощущения человека и отличает диалектический материализм от релятивистского агностицизма и идеализма». [2]

Ленин разоблачил попытки Маха и других идеалистов трактовать пространство и время антиматериалистически. В связи с этим он со всей решительностью осуждает предположение, будто бы элементарные материальные частицы материи и, в частности, электроны могут существовать вне трехмерного пространства. По этому именно поводу Ленин говорит:

«Естествознание не задумывается над тем, что вещество, которое им исследуется, существует не иначе, как в пространстве с 3-мя измерениями, а, следовательно, и частицы этого вещества, хотя бы они были так мелки, что видеть мы их не можем, «обязательно» существуют, в том же пространстве с 3-мя измерениями». [3]

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 213.
2 Там же, стр. 215.
3 Там же, стр. 148.

99

Нет ни одной основной физической проблемы, ни одного принципиального научно-философского вопроса, ложное толкование которых идеалистами всех оттенков не было бы проанализировано и

опровергнуто Лениным, исчерпывающе выяснившим истинные причины кризиса в физике и уклонов в сторону физического идеализма.

Ленин отмечает, что все эти уклоны объясняются недостаточным знакомством естествоиспытателей с диалектическим материализмом, и в заключение говорит:

«Современная физика лежит в родах. Она рожает диалектический материализм. Роды болезненные. Кроме живого и жизнеспособного существа, они дают неизбежно некоторые мертвые продукты, кое-какие отбросы, подлежащие отправке в помещение для нечистот. К числу этих отбросов относится весь физический идеализм, вся эмпириокритическая философия вместе с эмпириосимволизмом, эмпириомонизмом и пр. и т. п.».[1]

К сожалению, приходится признаться, что эти болезненные роды затянулись до наших дней. Как было уже отмечено выше и, как всем хорошо известно, кризис физики окончательно еще не Изжит и в последнее время даже приобрел особую остроту. Однако необходимо со всей определенностью констатировать, что установки диалектического материализма находят все больше и больше сторонников среди физиков не только в СССР, но и за границей. В целом ряде случаев у тех советских физиков, которые полностью еще не стали на позиции диалектического материализма, наблюдается тенденция к отмежевыванию от научно-философских течений, имеющих явно идеалистический характер. За границей имеется уже немало физиков, которые руководствуются в своей работе установками диалектического материализма. Ведущим среди этих физиков является крупнейший мировой ученый, друг Советского Союза, член Парижской Академии наук П. Ланжевен.

Остановимся теперь на некоторых главнейших примерах современных идеалистических уклонов в физике. У нас есть еще, к сожалению, отдельные представители физической науки, которые вопреки четким и ясным установкам диалектического материализма, развитым Лениным, пытаются воскресить в новых вариациях антиматериалистический лозунг «Материя исчезает». Ошибочно интерпретируя математические соотношения квантовой механики, они провозглашают «вновь открытые свойства материи» [2], сущность которых якобы заключается в том, что некоторые материальные объекты атомного масштаба принципиально не могут быть локализованы в пространстве и времени, — следовательно, обладают каким-то магическим свойством, хотя бы на короткое время, прекращать свое бытие в пределах нормальной пространственно-временной непрерывности. Однако, с мате-

---

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 256.

[2] См., напр., статью В. А. Фока в «Под знаменем марксизма», № 1 за 1938 г., стр. 152. (Примечание, добавленное в 1939 г.).

риалистической точки зрения, бытие вне пространства и времени есть величайшая бессмыслица, о чем и говорит Ленин в приведенной выше цитате.

Основная ошибка, которую делают некоторые наши физики, занимающиеся вопросами квантовой механики, заключается; в том, что они недостаточно критически относятся к явно махистским теоретико-познавательным установкам Бора, Гейзенберга и других зарубежных физиков. А эти установки, как известно, основаны на принципиальном отрицании возможности рассматривать всякий микрофизический объект как объект, реально существующий в пространстве и времени совершенно независимо от наблюдающего субъекта и вообще от каких бы то ни было вспомогательных наблюдательных приборов. Речь в данном случае должна идти вовсе не о том, умеем ли мы или не умеем достаточно точно установить локализацию в пространстве и времени того или иного микрофизического объекта, изучаемого нами. Это — излюбленная тема физиков, идеалистически интерпретирующих соотношение неопределенности и принцип дополнительности. Речь идет о совершенно другом, а именно о том, что всякий реальный объект — безразлично макрофизического или микрофизического масштаба — в каждый данный момент времени обязательно и безусловно должен занимать определенное место в пространстве, т.-е. может и должен иметь совершенно определенную пространственно-временную локализацию. Если что-либо

принципиально не может быть локализовано в пространстве и времени, следовательно, это «нечто» не существует объективно-реально вне нашего сознания и независимо от нашего сознания, а представляет собой фантастический вымысел идеалистического характера, могущий служить лишь предметом псевдофизических спекуляций.

Указанные мистические «вновь открытые свойства материи» находятся: в теснейшей связи с отрицанием универсальности принципа причинности, с отрицанием всеобщей и безусловной закономерности всего происходящего в природе, не допускающей никаких изъятий для области явлений атомного масштаба.

Несмотря на исчерпывающее разъяснение Ленина по вопросу о том, в какой мере признание универсальной закономерности в явлениях природы отражает нашу материалистическую установку, у нас есть еще физики, утверждающие вслед за зарубежными физиками-идеалистами, что принцип причинности сохраняет свою полную силу только в отношении явлений макрофизического масштаба, в явлениях же атомного масштаба могут иметь место случаи, когда этот принцип является неприменимым. Но ведь отказ от признания абсолютной универсальности принципа причинности обозначает не что иное, как допущение существования явлений, не стоящих ни в какой связи с другими явлениями, т. е, допущение возможности чудес.

Современный физик-исследователь настолько прочно стоит на позициях интуитивного признания полного соответствия между объективной закономерностью происходящих в природе явлений и методами математического их описания, что, сталкиваясь с неопределен-

101

ностью при математической трактовке микрофизических явлений, иногда делает неправильное заключение, сводящееся к отрицанию причинных связей в самих явлениях. Сущность возникающей в подобных случаях ошибки состоит в игнорировании настойчиво указываемого Лениным «относительного характера наших, т.-е. человеческих, приблизительных отражений... закономерности в тех или иных понятиях». [1] Ясно, следовательно, что, с материалистической точки зрения, соотношение неопределенности надо понимать не как повод к отрицанию принципа причинности при рассмотрении движений отдельного микрофизического объекта (например электрона), но лишь как простое указание на то, что в некоторых предельных случаях математический анализ данных опыта еще не в достаточной степени отражает закономерное протекание того или иного процесса. Однако, неопределенность в математическом описании отдельных явлений атомного масштаба, протекающих, конечно, столь же закономерно, как и явления макрокосмические, компенсируется значительно большей определенностью, достигаемой статистическими методами, которые приводят к менее искаженному отражению в нашем сознании общего хода явлений, происходящих в природе.

Итак, нет решительно никаких оснований к отказу от принципа причинности в отношении явлений микрокосмического порядка и к наделению электронов мистической «свободой воли», как это делалось и делается некоторыми физиками, придерживающимися идеалистических установок. Одно несомненно, а именно, что в объективно-реальном мире могут иметь место только такие явления, которые находятся в той или иной объективно-реальной же причинной зависимости от других явлений. Ленин говорит:

«Идея, будто познание может «создавать» всеобщие формы, заменять первичный хаос порядком и т. п., есть идея идеалистической философии. Мир есть закономерное движение материи, и наше познание, будучи высшим продуктом природы, в состоянии только отражать эту закономерность». [2]

Сомнения по поводу применимости принципа причинности в области явлений атомного масштаба совершенно естественно привели и к попыткам усмотреть нарушения закона сохранения энергии в некоторых явлениях того же масштаба. Идеалистический характер подобных попыток совершенно очевиден. По существу, закономерность всякого рода энергетических процессов в природе представляет собой лишь важнейший пример в ряду разнообразных закономерностей, характеризующих единство мироздания и обобщаемых нашим сознанием в формулировке всеобщего принципа причинности.

И в наше время, несмотря на полную определенность установок диалектического материализма, несмотря на четкие указания Ленина в его книге «Материализм и эмпириокритицизм», считается, к сожале-

[1] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 128. [2] Там же, стр. 138.

нию, допустимым говорить о пространстве как о чем-то самодовлеющем, не являющемся лишь объективно-реальной формой существования вечно движущейся материи. В физической науке еще находит себе место такой фетиш, как «абсолютно пустое пространство», хотя вполне очевидно, что форма бытия материи немыслима сама по себе, т.-е. не может существовать отдельно от материи.

Уклоны в сторону физического идеализма в вопросе о пространстве иногда принимают такой характер, что некоторые по существу своему идеалистические утверждения могут с внешней стороны кому-либо показаться материалистическими. Так, некоторые наши физики утверждают, что пространство само материально и что, например, электромагнитное поле есть лишь свойство этого «материального Пространства». [1] При этом концепция материи подменяется концепцией пространства.

В какой степени последнее утверждение является идеалистическим, явствует из нижеследующих слов Ленина:

«Метафизический, т.-е. антидиалектический, материалист может принимать существование материи (хотя бы временное, до «первого толчка» и т. п.) без движения. Диалектический материалист не только считает движение неразрывным свойством материи, но и отвергает упрощенный взгляд на движение и т. д.».[2]

Таким образом, подменяя концепцию материи концепцией пространства, мы приходим к необходимости рассматривать движение материального пространства и, между прочим, должны говорить о пространственных перемещениях элементов пространства, так как, с диалектико-материалистической точки зрения, всякое движение вообще обязательно включает в себе и пространственные перемещения. [3] Но совершенно очевидно, что идея о пространственных перемещениях элементов пространства, как такового, бессодержательна и абсурдна. Несомненно, вполне отдавая себе в этом отчет, идеалистически мыслящие физики так настойчиво и так резко протестуют против какого бы то ни было рассмотрения пространственных перемещений, неизбежно входящих в состав всякого электромагнитного поля. Однако подобным протестом эти физики совершенно отчетливо демонстрируют свои антиматериалистические установки.

Итак, некоторой части физиков у нас в СССР, к сожалению, еще не достаточно ясно, какое великое значение имеют установки диалектического материализма для правильного развития науки, о природе.

Не подлежит ни малейшему сомнению, что современная волна идеализма в физической науке будет преодолена совокупными усилиями материалистически мыслящих представителей физики. Залогом тому

[1] См. напр., статью С. И. Вавилона в «Под знаменем марксизма», № 7 за 1937 г., стр. 61. (Примечание, добавленное в 1939 г.).

[2] Ленин. Соч., т. XIII, стр. 221.

[3] Подробнее об этом говорится в статьях V и VI настоящего сборника. (Примечание, добавленное в 1939 г.)

служит путеводный маяк — знаменитая книга Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», вдохновляющая и направляющая всех борющихся против идеализма. Эта задача в значительной степени облегчается руководящими указаниями товарища Сталина — великого продолжателя дела Ленина.

На представителях советской физической науки лежит почетная и ответственная обязанность — бороться в передовых рядах за диалектический материализм в науке о природе.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

VIII

ВЫДЕРЖКИ ИЗ СТЕНОГРАММЫ ДИСКУССИИ О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

(происходившей в 1929 и 1930 гг. в Ленинградском Политехническом институте) [1]

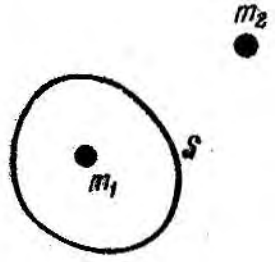
ВТОРАЯ БЕСЕДА

(3 января 1930 г.)

В. Ф. Миткевич. — Когда мы говорим о природе какого-либо физического явления, мы, конечно, не должны обольщать себя мыслью будто бы нам, при современном состоянии физики, доступно проникновение во все детали того, что происходит в действительности. Это является лишь идеалом физики, отдаленным маяком, манящим Исследователя. Практически же мы можем только медленно, шаг за шагом, приближаться к этой отдаленной цели. Ясно, что в такой, подчас очень трудной, работе мы можем и должны руководствоваться некоторыми точками зрения, возникающими в процессе изучения явлений. Но эти точки зрения мы обязаны подвергнуть самой беспощадной критике, прежде чем дерзать на основе их создавать вероятную картину того, что происходит в действительности. Сверх того, если мы хотим рассуждать как физики, мы должны понимать, что в действительности происходит не то или иное, в зависимости от нашей точки зрения, а нечто совершенно определенное и во всяком случае нечто, не подчиненное нашей точке зрения.

Чем же мы можем и должны руководствоваться при этой предварительной критике различных точек зрения на данное физическое явление? Единственный ответ, который, по моему мнению, можно дать на этот вопрос, заключается в том, что мы всегда должны прежде всего, руководствоваться степенью физического смысла, присущего той или иной точке зрения. Я поясню сказанное классическим примером из области теории тяготения, Ньютон открыл закон всемирного тяготения и сформулировал его, затем он воспользовался им для математической разработки ряда вопросов, касающихся движения небесных тел. Достигнутые в области небесной механики результаты были таковы, что математик Ньютон мог бы в полной мере гордиться ими и получить полное удовлетворение. Но посмот-

[1] «Электричество», 1930, №№ 3, 8 и 10.



Фиг. 5.

рим, что думал физик Ньютон по поводу явления тяготения. Прежде всего, нужно напомнить, что он в самой формулировке закона тяготения указывал, что «все происходит так, как будто бы тела притягиваются». Дальше я позволю себе прочесть отрывок из третьего письма Ньютона к Бентлею, где он говорит следующее: «Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим непрерывно, согласно известным законам...». Так сказал физик Ньютон. К сожалению, до последнего времени среди лиц, занимающихся физикой, нет достаточно ясного

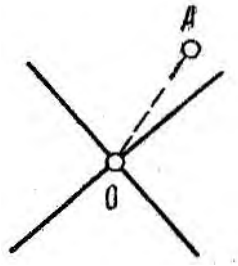
понимания этих слов физика Ньютона, и поэтому я позволю себе на элементарном примере показать, что мы должны разуметь под «абсурдом» и в чем он заключается.

Представим себе массу m_1 и массу m_2 (фиг. 5). Предположим, что эти массы действительно могут влиять друг на друга на расстоянии. Это значило бы следующее. Пусть некоторая поверхность S, совершенно замкнутая, окружает со всех сторон массу m_1. Если кто-либо допускает, что масса m_1 действует на расстоянии на массу m_2, то, следовательно, он считает возможным осуществление этого действия без того, чтобы какой-нибудь физический агент в какой-либо части поверхности S проникал сквозь нее.

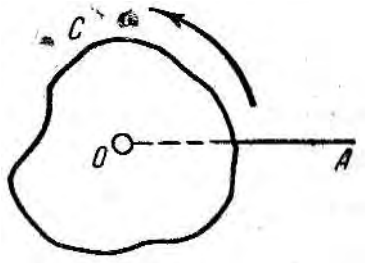
Конечно, это можно себе представить, если призвать на помощь спиритические или медиумические явления, но физики до последнего времени обычно этим не пользовались и обходятся без этого. Поэтому для всякого ясно, что физик не может говорить о такой схеме физического представления иначе, как о величайшем абсурде. Таким образом, математик Я. И. Френкель, подобно математику Ньютону, имеет законное право и иногда, быть может, должен при математическом рассмотрении вопросов из области электромагнетизма пользоваться идеей действия на расстоянии, но если Я. И. Френкель желает говорить как физик, он должен помнить прочитанные мною золотые слова физика Ньютона, должен учитывать всю физическую абсурдность идеи действия на расстоянии и ставить actio in distans на надлежащее место.

Можно привести бесчисленное множество примеров, когда при математическом рассмотрении какого-либо вопроса, какого-нибудь физического явления мы представляем себе его не, так, как оно происходит в действительности. Это бывает математически удобно и

106



Фиг. 6.



Фиг. 7.

совершенно законно в этом смысле. Я остановлюсь на нескольких элементарных примерах для того, чтобы пояснить свою мысль. Представим себе некоторую материальную точку, которая вдоль направляющей рейки перемещается по прямой линии из точки O в точку A (фиг. 6). Это есть вполне определенный физический процесс. Математик или теоретик механик совершенно законно применяет разложение этого перемещения на какие-либо составляющие, в частности можно как угодно провести одну ось, проходящую через точку O, и перпендикулярно к ней вторую ось, а затем перемещение материальной точки из O в A разложить на две составляющие по этим осям. Таких разложений существует бесчисленное множество. Все они абсолютно законны с математической точки зрения. Но из всех комбинаций разложения, которые все одинаково законны при математическом рассмотрении вопроса, единственное разложение, соответствующее действительности, есть такое разложение, при котором одна из осей проходит через точки O и A. Тогда одна составляющая есть полное перемещение, а другая равна нулю.

В виде второго примера представим себе некоторое тело *C*, которое вращается вокруг оси *O*, перпендикулярной плоскости чертежа (фиг. 7). Предположим, что угол поворота мы отсчитываем от неподвижного направления *OA*. Допустим, что тело *C* вращается в положительную сторону и делает *a* , оборотов в секунду. Это есть действительное физическое явление. Математик или теоретик механик совершенно законно в известных случаях может рассматривать это вращение, как происходящее следующим образом. Одновременно с вращением в положительную сторону со скоростью *a* оборотов в секунду, можно представить себе еще добавочное вращение в ту же сторону со скоростью в 10^n оборотов в секунду. Представим себе далее и одновременное вращение в другую сторону со скоростью — 10^n оборотов в секунду. Результат от этого нисколько не изменится, но в математическом исследовании это построение может оказаться полезным, и мы иногда пользуемся таким построением, причем *n* может быть какое угодно число, может быть даже миллион, миллион миллионов, миллион в миллионной степени, все что угодно. Однако физически это не приемлемо, физически есть только определенное вращение, считаемое от направления *OA*. Физический смысл имеет только предположение, что $n = -\infty$, а математический смысл имеет любое предположение.

107

Последний пример возьмем из области нам более близкой, из области теории магнетизма. Мы привыкли пользоваться представлением о магнитной массе. Представление о единице магнитной массы лежит в основании абсолютной электромагнитной системы единиц. Это есть, так сказать, законное использование фиктивного представления, которое является результатом математической трактовки вопроса, но никому из нас теперь и в голову не придет мысль, что магнитная масса в действительности существует. Это есть лишь величина, которою с большой выгодой пользуются и должны пользоваться при математическом исследовании. Итак, некоторые точки зрения на данное физическое явление могут быть чрезвычайно плодотворными и ценными в математическом отношении и в то же время могут быть совершенно неприемлемыми в решении вопроса о том, что происходит в действительности.

Я перехожу теперь к теме нашей беседы, вернее сказать, нашего спора о природе электрического тока. Как совершенно определенно выяснилось в прошлый раз, здесь есть две, по моему мнению, совершенно непримиримые точки зрения. Первая точка зрения, — ее наиболее ярким выразителем является Я. И. Френкель, — отстаивает действие на расстоянии. Другая точка зрения, которую защищаю я, кладет в основу своих рассуждений участие промежуточной среды, окружающей центр или ось, вокруг которых ориентируется то или иное электромагнитное явление. Я не думаю, чтобы после того, что я уже сказал, необходимо было много говорить относительно физической состоятельности той или другой точки зрения, но все-таки позволю себе добавить еще несколько слов. Если точка зрения простого действия на расстоянии является физическим абсурдом, то тем большим физическим абсурдом является точка зрения запаздывающего действия на расстоянии. Это есть ценный математический прием, придуманный Лоренцом. Прием этот может много дать при формальном описании электромагнитных явлений, но это, конечно, абсолютный физический абсурд, В дополнение к тому, что я здесь говорил относительно физической абсурдности идеи действия на расстоянии, представим себе, что у нас имеется некоторая система, способная излучать электромагнитную энергию. Допустим, что радиостанция *A* в некоторый момент времени начинает генерировать очень мощное излучение, распространяющееся на колоссальное расстояние. Возьмем расстояние столь большое, что оно проходится электромагнитным излучением в десять лет, пока оно не дойдет до некоторого удаленнейшего радиоприемника *B*. Предположим, что после того, как радиостанция *A* уже поработала, мы ее совершенно уничтожим. Допустим, что радиоприемник *B* в момент излучения может даже не существовать и лишь потом, в конце десятого года, мы можем успеть построить приемную систему. Через десять лет излученная электромагнитная энергия будет принята системой *B*. А в промежутке, в течение десяти лет, где находится излученная энергия, где находится физический агент, который должен в конце концов воздействовать на приемник *B?* С точки зрения Я. И. Френкеля, нигде. Такое объ-

108

ясненне физически не допустимо. Если мы рассуждаем как физики, подобное объяснение мы должны квалифицировать как полный абсурд, но при формально-математическом рассмотрении вопроса мы имеем законное право иногда так рассуждать. Как математик, Ньютон правильно пользовался теми положениями, которые, как физик, считал абсурдными.

В прошлый раз в словах Я. И. Френкеля я усмотрел некоторый упрек по адресу метода мышления Фарадея. Он сказал, что Фарадей «не мог себе представить действия на расстоянии», и сказал это с некоторым оттенком осуждения. Я далек от мысли защищать Фарадея от нападок со стороны Я. И. Френкеля, но полагаю необходимым указать, что Фарадей потому именно и считается нами величайшим из физиков, что он в недосягаемой для других степени обладал способностью различать физически приемлемое от физически абсурдного. Поэтому-то он и оказался способным обогатить науку рядом достижений, сделавших эпоху. Защищаемая мною точка зрения Фарадея, развитая далее трудами Максвелла, имеет все признаки физически состоятельной точки зрения. Конечно, возможно, что фарадее-максвелловская точка зрения требует некоторых дальнейших уточнений и дополнений, но в общем она вполне может служить нам путеводной нитью при построении вероятной картины того, что происходит в действительности в том электромагнитном процессе, который мы сейчас разбираем.

В прошлый раз П. С. Эренфест, исходя из благородного побуждения примирить спорящие стороны, сказал: «В теперешний момент эти две точки зрения эквивалентны». Да, конечно, они эквивалентны в математическом отношении, при математическом описании явления электрического тока, но ведь это вовсе не относится к теме нашей беседы. В то же время эти две точки зрения абсолютно неэквивалентны в отношении их физического смысла. П. С. Эренфест предложил поставить специальный опыт — experimentum crucis, при помощи которого можно было бы решить, какая точка зрения правильна, какая ошибочна. Я не вижу никакого физического смысла в таком эксперименте. Он ни к чему не приведет. Ввиду математической эквивалентности этих двух точек зрения, конечно, любой эксперимент мы можем и должны описать и тем, и другим способом. Но совершенно ясно, что одна точка зрения при всей ее математической законности и ценности является физическим абсурдом, а другая — физически состоятельна и вполне приемлема. Это совершенно очевидно уже теперь, и я поэтому очень возражаю против пессимизма П. С. Эренфеста, который сказал, что может быть нам придется умереть раньше, чем наш спор приведет к какому-нибудь заключению. Умирать не надо, надо жить. По моему, спор решается уже сейчас в плоскости простого здравого смысла.

А. Ф. Иоффе в своем выступлении сказал: «правильно понимаемая электронная теория должна являться дополнением и развитием максвелловской теории». Прекрасные слова, подписываюсь под ними. При этом под правильным пониманием я подразумеваю полный учет

109

всех тех следствий, которые вытекают из признания абсолютной физической абсурдности идеи действия на расстоянии. Когда этот полный учет будет осуществлен, тогда, конечно, не будет противоречий между большими достижениями электронной теории и представлением Максвелла об электрическом смещении, которое явилось одним из базисов его физической теории.

Итак, в дальнейшем при рассмотрении вопроса о природе электрического тока, занимаясь физическим, а не математическим описанием, мы можем, мы обязаны считаться с фарадее-максвелловской точкой зрения, которая оказывается единственной физически состоятельной. Я буду основываться на том положении, которое вызвало особенно ожесточенный спор в прошлый раз, а именно, что в каждом элементе объема в пространстве вокруг проводника с током содержится некоторый запас энергии. Этот запас энергии мы не можем, рассуждая как физики, не связывать с каким-то процессом, происходящим в этом же объеме, причем процесс должен быть таковым, чтобы картина его способна была более или менее охватить все стороны, все свойства электромагнитного поля. Делая попытку в этом направлении, Дж. Дж. Томсон в свое время воспользовался представлением о единичных трубках электрического смещения, названных Им фарадеевекими трубками. Дж. Дж. Томсон вместе с Пойтингом дал целый ряд чрезвычайно интересных построений, которые иллюстрируют с этой точки, зрения процесс электрического тока в самых разнообразных

случаях. Все это необычайно изящные картины, помогающие очень глубоко проникнуть в тонкости процесса электрического тока. С точки зрения Дж. Дж. Томсона и Пойтинга, магнитное поле надо представлять себе, как форму нашего восприятия движущихся фарадеевских трубок. Однако эта точка зрения приводит в целом ряде случаев к непреодолимым трудностям. С этой точки зрения, например, чрезвычайно трудно уяснить существование магнитного поля вокруг сверхпроводника, по которому течет ток. Далее, с этой точки зрения чрезвычайно трудно объяснить магнитное вращение плоскости поляризации света и т. д. В виду этого я сделал попытку обратиться к магнитному полю и положить именно его в основание картины того физического процесса, который является носителем энергии, в случае электрического тока. Здесь я обратился к старым, мало использованным работам Максвелла, в которых он трактует вопрос о вероятной природе магнитного Поля. К этому же вопросу он обратился и довольно основательно его еще раз разобрал в одной из последних глав второго тома своего Трактата. Проанализировав открытое Фарадеем явление магнитного вращения плоскости поляризации света, и в полном соответствии с некоторыми ранее высказанными идеями Вильяма Томсона (Кельвина), Максвелл пришел к необходимости утверждать, что в магнитном поле мы имеем дело с каким-то вращением. В каждом элементе объема магнитного поля мы имеем такое вращение, причем это вращение совершается вокруг оси, совпадающей с направлением вектора магнитной силы. Идя по этому

пути, мы, вместе с Максвеллом приходим к заключению, что физическое магнитное поле, воспринимаемое нами, как магнитный поток, должно состоять из некоторых вихревых нитей. Отдельные математические работы, которые Максвелл посвятил исследованию этого вопроса, анализируют представление о магнитных вихревых нитях. В этом отношении невольно напрашивается сближение максвелловских вихревых нитей с гельмгодьцевскими замкнутыми вихревыми нитями в идеальной жидкости. Целый ряд основных свойств тех и других в значительной мере совпадает. Таким образом, мы подходим к некоторой конкретизации мысли Фарадея о «physical lines of force», о физически существующих магнитных линиях. В своих работах Максвелл очень обстоятельно исследовал вопрос о возникновении электрического смещения при движении магнитных. вихрей и показал, что на почве представления о магнитных вихрях имеется возможность очень простого и естественного подхода к объяснению возникновения деформации электрического смещения при движении магнитных вихревых нитей. Таким образом, беря в основу дальнейших рассуждений физически существующие магнитные линии, понимаемые мною как магнитные вихри, мы имеем в своих руках нечто, способное охватить весь комплекс электромагнитных явлений, и в этом я вижу большую ценность такого представления.

Пользуясь представлением о магнитных линиях как о реально существующих элементах магнитного потока, я в ряде своих последних работ [1] подверг обследованию свойства магнитного потока. Мое удалось предвидеть и обнаружить на опыте две составляющие магнитного потока взаимной индукции. Поток взаимной индукции мы обычно выражаем через $M_n i_1$, где i_1 — ток в первичной цепи, а M_n —нормальный коэффициент взаимной индукции. Я установил, что есть некоторая другая составляющая, которая выражается через

$$-M_a \frac{di_1}{dt},$$

т.-е. через первую производную тока по времени. Существование этой аномальной составляющей потока взаимной индукции есть необходимое следствие основного фарадеевского представления о магнитном потоке как о совокупности реально существующих замкнутых магнитных линий. Через M_n я обозначил аномальный коэффициент взаимной индукции. Таким образом, полный поток взаимной индукции, сцепляющийся со вторичною цепью, получает следующий вид:

$$\Phi_2 = M_n i_1 - M_a \frac{di_1}{dt}.$$

Далее я (предвидел и обнаружил на опыте вторую составляющую электродвижущей силы взаимной индукции. Нормальная составляющая

выражается, как известно, через $e_n = -M_n \frac{di_1}{dt}$; аномальная же составляющая выражается соотношением $e_a = M_a \frac{d^2 i_1}{dt^2}$, т.-е. выра-

[1] См. «Доклады Академии Наук СССР», серия А, 1929, стр. 131, 136, 171, 259 и 289.

111

жается через вторую производную первичного тока по времени, Это опять-таки непосредственно следует из основных представлений Фарадея. Полная электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной цепи (при условии постоянства геометрических координат выражается, следовательно, так:

$$e_2 = -M_n \frac{di_1}{dt} + M_a \frac{d^2 i_1}{dt^2}.$$

В связи с указанными результатами я с тем большим правом в своих дальнейших построениях буду пользоваться представлением о магнитных линиях, как об исходных элементах при объяснении явлений, происходящих в электромагнитном поле.

В. Ф. Миткевич. — Я нахожусь в чрезвычайно тяжелом положении, отвечая на то, что говорит Я. И. Френкель. Я прямо смущен до чрезвычайности. Он применил особый полемический прием. Я стремился поспорить с (физиком Я. И. Френкелем, а он подменил физика чистым математиком. У нас нет общего языка. Я не знаю, как говорить. Если вы, Яков Ильич, как физик действительно можете примириться с тем невероятным абсурдом, что некоторая масса m_1 (фиг. 5) может действовать на расстоянии на массу m_2 без того, чтобы какой-либо физический агент проникал сквозь замкнутую поверхность, окружающую массу m_1 то я вынужден заподозрить вас в том, что вы тайный адепт спиритизма. Иного объяснения нет! Повторяю, математик Я. И. Френкель имеет право так рассуждать, законное, абсолютное право. Собственно говоря, все, что на эту тему Я. И. Френкель говорил, он говорил как математик. Мне очень трудно с ним спорить потому, что все продолжается в таком же роде. Если математик Я. И. Френкель со мной спорит, то ясное дело, что он говорит по-прежнему с точки зрения дальнодействия. Я ведь с самого начала напомнил, что мы совсем не занимаемся вопросами математического описания явлений тока, мы хотим подойти к вероятной картине того, что в действительности происходит. У меня создалось такое ощущение, будто бы я не говорил этого совсем. Я указывал, что в силу математической эквивалентности разных точек зрения, я не считаю нужным производить тот опыт, о котором П. С. Эренфест в прошлый раз говорил. Этот опыт не имеет физического смысла потому, что формальное описание какого угодно физического явления должно быть возможно и с той, и с другой точки зрения. Далее я утверждаю, что, придерживаясь темы нашей беседы, нужно категорически ясно сказать, какова при современном состоянии знаний вероятная картина того, что происходит в действительности. Я не понимаю, о чем можно еще говорить по, вопросу о природе электрического тока.

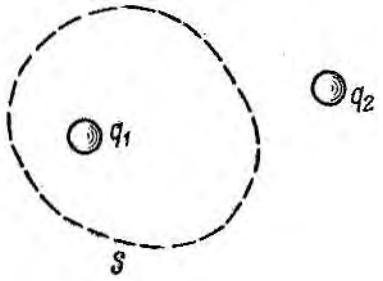
112

ТРЕТЬЯ БЕСЕДА (14 марта 1930 г.)

В. Ф. Миткевич. — Я буду очень краток, для того чтобы дать Я. И. Френкелю время изложить физическое содержание его представлений о природе электрического тока. Я хочу подвести итоги того, что выяснилось в связи с моими выступлениями на двух предыдущих беседах. Речь идет, как М. А. Шателен подчеркнул, о природе электрического тока, а не об электрическом токе вообще. Следовательно, к теме беседы имеют отношение отнюдь не математические методы описания электрического тока, а именно только наши физические представления об электрическом: токе. Математические соотношения интересны для нас лишь постольку, поскольку они дают материал для суждения о том, что в действительности происходит. Анализируя наши общие физические представления и стремясь осветить основу этих представлений, я в прошлый раз дошел до простейшего случая, до такого примера, который в высокой степени просто выявляет физическую состоятельность различных возможных точек зрения. Я имею в виду случай взаимодействия двух каких-либо физических центров. Иллюстрируя физические взгляды Ньютона, я говорил о двух тяготеющих

массах. Совершенно также, конечно, обстоит дело и в случае взаимодействия двух, например, электрических зарядов. Представим себе электрический заряд q_1, электрический заряд q_2 и некоторую замкнутую поверхность S, окружающую со всех сторон заряд q_1 (фиг. 8). В прошлый раз я поставил вопрос, который могу сейчас сформулировать применительно к электрическим зарядам. Вопрос заключается в следующем: может ли электрический заряд q_1 взаимодействовать с зарядом q_2 без того, чтобы какой-либо физический агент проникал сквозь замкнутую поверхность S? Вот тот вопрос, который я поставил и который имеет весьма существенное значение при обсуждении всего, что касается природы электрического тока. Необходимо совершенно ясно и четко сказать «да» или «нет». Либо «да», либо «нет». Либо то, либо другое. Середины не может быть!

Подвожу теперь итог того, что выяснилось во время предыдущих бесед. Я самым решительным образом утверждал, что мы должны категорически отрицать возможность ответа «да» и говорить только «НЕТ». С этим ответом связано определенное физическое мировоззрение. Если не может иметь места взаимодействие между q_1 и q_2 без того, чтобы некоторый физический агент проникал сквозь замкнутую поверхность, значит какой-то промежуточный агент есть. Как его мыслить, это совершенно другой вопрос. Можно себе представить, например, что из зарядов q_1 и q_2 вылетают какие-то особенные физические кванты. Можно представлять себе это как угодно иначе. Мне кажется, лучше всего стоять на точке зрения Фарадея-Максвелла и мыслить некоторую промежуточную среду, Представляющую собою основной физический фон, на котором разви-



Фиг. 8.

ваются все электромагнитные процессы. Но так или иначе, имеется физический посредник между этими двумя зарядами q_1 и q_2.

Я. Г. Дорфман в прошлый раз выступил с совершенно определенным ответом на поставленный мною вопрос и сказал «ДА»! Он откровенно и смело утверждал, что именно полным абсурдом является мысль о физическом посреднике между взаимодействующими на расстоянии центрами. Я. И. Френкель не счел возможным дать прямой ответ на принципиальный вопрос, касающийся взаимодействия двух физических центров (фиг. 8), но он так много говорил в защиту точки зрения действия на расстоянии, что я, конечно, не рискую ошибиться, если скажу, что он так же рассуждает, как и Я. Г. Дорфман, т.-е. что он так же считает абсурдом предположение, будто физические центры не могут взаимодействовать на расстоянии через пустоту, в полном смысле этого слова, без физического посредника. Таким образом, ответом Я. И. Френкеля на поставленный мною вопрос надо признать определенное «ДА».

Итак, мы имеем две совершенно определенные исходные точки зрения; точку зрения Фарадея-Максвелла и точку зрения actio in distans. Это — противопоставляемые в нашем споре исходные физические воззрения. Я указывал, что, рассматривая вопрос о природе электрического тока и исходя из фарадее-максвелловских основных воззрений об участии промежуточной среды — физической первоосновы, на фоне которой проявляются электромагнитные процессы, можно различными способами пытаться построить вероятную картину того, что происходит в действительности. Я упоминал о воззрениях Дж. Дж. Томсона, о картине, в основу которой вдадутся физически существующие фарадеевские трубки электрического смещения. Это — стройная картина, которая многое красиво объясняет. Мне представляется, однако, что в ряде случаев не все легко объяснить. Поэтому я пытаюсь построить другую картину и при этом исхожу из представления о реально

существующих магнитных линиях. Это мне кажется особенно интересным, потому что Фарадей, который сам говорил вначале об электрических «physical lines of force», к концу своей деятельности, после тщательного анализа всего того, что им было открыто, склонялся к преимущественному значению идеи о реально существующих магнитных линиях. Можно далее говорить об электронной теории, учитывающей промежуточную среду. Это будет самая законная электронная теория, которая должна являться тем, о чем говорил А. Ф. Иоффе, т.-е. дальнейшим развитием и углублением фарадее-максвелловской теории. Наконец, может быть, со временем будет создана некоторая теория «X», которая даст более полную и стройную картину того, что происходит в действитель-
114
ности в случае электрического тока. Но, так или иначе, все это представляет собою возможные пути развития основной фарадее-максвелловской точки зрения. С другой стороны, можно построить наше представление о природе электрического тока, исходя из точки зрения actio in distans. Здесь можно говорить об электронной теории, не учитывающей промежуточной среды. Можно, наконец, представить себе, что появится некоторая новая теория, исходящая из actio in distans. Назовем ее теорией «Y». Вот, собственно говоря, общая схема нашего спора, Я все время пытался свести то, что говорилось, в плоскость данной схемы, полагая, что в этом суть дела. Может показаться, что наш спор бесплоден. Я полагаю, однако, что в нашем споре был большой физический смысл и что в сумме было сказано не мало ценного. Это дало возможность заострить нашу мысль и если не окончательно разрешить вопрос о. природе тока; то во всяком случае продвинуть вперед анализ всего того, что имеет самое непосредственное отношение к вопросу о природе тока. *В. Ф. Миткевич.*
.....
.....
Я скажу теперь несколько слов по поводу очень интересного доклада Я. И. Френкеля. Во-первых, я констатирую тот факт, что с точки зрения Якова Ильича проводниковый электрический ток не есть непрерывный, сплошной физический процесс, как эта мною мыслится, но представляет собою лишь комбинацию, так сказать, точечных токов. В тех местах, где есть электроны, есть изолированные точечные токи. В других местах ничего нет. Это — комбинаций совершенно обособленных точечных токов. По-видимому, это безусловно так?
Я. И. Френкель. Так.
В. Ф. Миткевич. Меня очень смущает некоторая недомолвка Я. И. Френкеля. Он не увязал своей мысли, касающейся энергии электромагнитного поля, с тем утверждением, которое по существу делает относительно моего основного вопроса (фиг. 8). По Я. И. Френкелю, вне электрона ничего нет, абсолютно пустое пространство! Предположим, что мы имеем какой-то контур проводника, по которому течет ток. Здесь движутся электроны. Согласимся на время с Я. И. Френкелем, что это и есть реальный процесс тока. Допустим далее, что вокруг проводника абсолютная пустота и что, следовательно, никакого физического процесса в этой пустоте нет.
Я. И. Френкель. Никакого процесса движения!
В, Ф. Миткевич. Ничего нет! Абсолютная пустота. Нет никакого реального физического процесса! В таком случае я задам вопрос: где находится электрокинетическая энергия этого тока? Хотя Я. И. Френкель и говорит об объемном интегрировании для получения электромагнитной энергии, но, по его мнению, это лишь удобный математический прием. Если вне проводника с током нет никакого реального физического процесса, следовательно, по Я. И. Френкелю, электрокинетическая энергия тока находится внутри
115
проводника. Это вытекает из общих утверждений Я: И. Френкеля, начиная от этого «ДА» (показывает на доску, где выписаны ответы на вопрос, относящийся к фиг. 8). Итак, по Я. И. Френкелю, энергия тока находится внутри проводника, а в пространстве, окружающем проводник, ничего нет! Теперь представим себе какую-либо передачу электрической энергии на большое расстояние. Я спрошу: где течет энергия, передающаяся вдоль этой линии передачи? Напоминаю: проводник в абсолютной пустоте, где ничего нет. Я. И. Френкель, очевидно, полагает, что энергия

течет внутри проводника. Ничего иного нельзя себе представишь с его точки зрения. Здесь кроется глубокое недоразумение и явная недоговоренность со стороны Я. И. Френкеля. Он говорил, правда, что физик должен сделать над собою усилие и привыкнуть к точке зрения actio in distans. Сделаем допущение, что для обычного случая, для проводника нормального, можно как-то «привыкнуть» К точке зрения Я. И. Френкеля. Но что будет, если мы возьмем сверхпроводящую линию? Предположим, что передается энергия переменного тока. Во всех точках внутри сверхпроводника H является константой. Никакого переменного магнитного поля не будет во всех точках внутри проводника. Как же это энергия переменного тока течет внутри проводника? Не могу понять. Какая-то неувязка в физических представлениях Я. И. Френкеля о природе электрического тока. Впечатление такое, что ему хочется пользоваться Фарадее-максвелловскими представлениями, но он не считает возможным это открыто признать. Иначе никак невозможно объяснить то, что говорит Я. И. Френкель. Наконец, позволю себе задать еще вопрос. Если мы имеем два тока i_1 и i_2, через что осуществляется физическое взаимодействие, механическое или индуктивное, между двумя контурами тока? Я даю известный всем присутствующим ответ. Я. И. Френкель дает такой ответ: «Без участия какого-либо промежуточного физического агента». Ни через что! Верно?

Я. И. Френкель. Верно,

В. Ф. Миткевич. Я констатирую факт. Я, пожалуй, могу этим и ограничиться. Еще только маленькое замечание по поводу, того, что Я. И. Френкель говорил о некоторых приемах математического описания, как об очень «удобных» и потому, якобы, могущих лечь в основание наших физических представлений. Я думаю, что это недостаточный критерий для того, чтобы этими математическими приемами пользоваться при описании вероятной картины того, что происходит в действительности. Математически это удобно, а физического смысла в этом нет! Тут необходим другой критерий. Пока этим ограничусь.

В. *Ф. Миткевич*. Яков Ильич, я смущен тем, что слышал. Вы говорите, что с защищаемой мною точки зрения Фарадея-Максвелла действие распространяется с бесконечной скоростью, а с вашей точки зрения — с конечной. Я очень удивлен. Как раз именно фарадее-мак-

свелловская точка зрения внесла в физику представление о конечном распространении электромагнитного действия, и опыт подтверждает теорию. Вывод Максвелла в свое время поверг в смущение всех защитников идеи действия на расстояние. Они считались только с мгновенной передачей, и всем, кто пережил эту эпоху, одно время казалось, что тут произнесен смертный приговор над actio in distans. Но Лоренц придумал очень красивый математический прием запаздывающего actio in distans, и, таким образом, удалось формально описать то, что Максвелл получил, исходя из представления об участии промежуточной среды. Итак, как раз максвелловское воззрение внесло в науку представление о конечной скорости распространения электромагнитных действий, а точке зрения actio in distans пришлось изобрести корректив для того, чтобы спастись и иметь возможность математически увязаться с тем, что Максвелл получил, исходя и» представления о промежуточной среде. В общем то, что Я. И. Френкель сказал в своем последнем выступлении клонится к тому, что можно рассуждать и так, можно рассуждать и иначе, т.-е. что обе точки зрения математически абсолютно эквивалентны. Но ведь это совершенно не относится к теме нашей беседы и потому никого сейчас не должно сколько-нибудь интересовать. Я уже говорил, что не согласен с П. С. Эренфестом, который полагал, что специальным экспериментом можно показать справедливость одной или другой из точек зрения. Математически они всегда будут эквивалентны. Лоренц наглядно показал, как можно в случае надобности дополнить некоторую точку зрения, когда необходимо объяснить новые факты. Я не спорю, быть может, необходимо внести некоторые дополнения и в фарадее-максвелловскую точку зрения, чтобы все хорошо объяснить. Всякое новое достижение в области физики может повлечь за собою некоторый корректив, ничего не меняющий в существе данной точки зрения. Суть дела в том, что одна точка зрения физически состоятельна, а другая в этом отношении очень грешит и приводит к физическому абсурду. Я очень рад, что оказываюсь не в единственном числе, что выступавшие здесь философы в основном присоединились ко мне. Итак,

точка зрений actio in distans физически несостоятельна, как указал еще Ньютон. А Ньютон как будто бы является некоторым авторитетом для нас. Великий математик и великий физик! Как математик он с успехом пользовался идеей actio in distans, но как физик он говорит — «это абсурд». Я. И. Френкель говорил об условной возможности локализации энергии. Конечно, это есть лишь формально математический ответ на вопрос, касающийся природы физического явления — электрического тока. Все-таки в конце концов, по существу, у Я. И. Френкеля остается то, что вокруг проводника с током абсолютно никакого физического, процесса нет. Абсолютная пустота! Если в данном элементе объема вокруг проводника с током есть физический процесс, то мы обязаны признать, что там есть нечто реальное. Математик, конечно, может говорить иначе, а физик не может иначе говорить. Энергия есть реальный физический агент. Если в пространстве вокруг проводника с

током нет никакого физического процесса, то, следовательно, там не может быть локализована какая-либо энергия. Следовательно, с точки зрения Я. И. Френкеля, электрокинетическая энергия тока содержится внутри проводника. Так выхолит из его основных положений (ответ «ДА»), Мы ясно видим, однако, что у Я. И. Френкеля есть в то же время тенденция использовать некоторые весьма удобные для него как математика представления Фарадея и Максвелла. Я. И. Френкель не может обойтись без максвелловского объемного интеграла энергии, распространенного по пространству, окружающему проводник с током, рискуя в противном случае обязательством открыто утверждать, что электрокинетическая энергия тока локализована внутри проводника. Правда, он не хочет сказать Этого ясно и определенно, Я за него это говорю! Итак, в физических представлениях Я. И. Френкеля о природе электрического тока встречаются глубокие противоречия, которые являются следствием его стремления видеть в идее actio in distans нечто большее, чем простой математический прием.

Я должен кончать, потому что уже поздно. В заключение позволю себе воспользоваться образным научным языком, на котором во время первой беседы выражали свои мысли Я. И. Френкель и А. Ф. Иоффе. Я. И. Френкель упрекал меня в том, что я, как бы увлекаясь идеей о каком-то «чорте», стремлюсь решить вопрос, есть ли у чорта хвост или нет. Теперь я каюсь: действительно, я ловил долгое время, многие годы, и во время наших трех бесед продолжал ловить «чорта». Этот «чорт» есть actio in distans! Мне кажется, что я его, наконец, уловил, что я оборвал ему «хвост», так что он теперь «без хвоста». А. Ф. Иоффе рассказывал нам красивую басню о медведе и неосторожном охотнике. Я полагаю, что эти образы хорошо олицетворяют те непримиримые точки зрения, которые столкнулись здесь во время наших бесед о природе электрического тока. Какая точка зрения есть медведь, а какая — неосторожный охотник, об этом я предоставляю судить присутствующим.

IX

ВЫДЕРЖКИ ИЗ СТАТЬИ «К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА» [1]

1. При описании разного рода явлений мы нередко пользуемся терминологией, исторически сложившейся в условиях недостаточно полного понимания природы этих явлений. По инерции мы продолжаем обычно применять подобную терминологию и тогда, когда общий прогресс знаний уже с очевидностью свидетельствует о том, что она в большей или меньшей степени не соответствует действительности. В целом ряде случаев от этого не проистекает никаких недоразумений. Мы, например, говорим: «солнце всходит и заходит», отдавая себе полный отчет в том, что на самом деле этого нет и нам только так кажется. При быстрой езде на автомобиле или при полете на аэроплане в безветренную погоду мы, пользуясь обычным языком, говорим: «ветер дует нам в лицо», и это нисколько не мешает нам совершенно ясно понимать, о чем идет речь. Иногда, однако, старая привычная терминология как бы гипнотизирует нас, удерживая во власти ошибочных точек зрения, и таким образом тормозит правильную оценку вновь открываемых фактов. В этом отношении один из наиболее ярких примеров мы имеем в случае электромагнитного явления, называемого электрическим током.

2. «Из двух предположений, весьма обычно принимаемых в настоящее время, о магнитных жидкостях и об электрических токах первое необходимо признать ошибочным, а быть может и оба ошибочны».[2] Это суждение было высказано Фарадеем еще в 1854 г. в результате тщательного анализа всего известного ему из области электромагнитных явлений, Однако многое из того, что совершенно отчетливо было понято Фарадеем, этим величайшим физиком-мыслителем, до настоящего времени недостаточно оценено и, вообще говоря, почти совершенно не нашло себе отражения в последующей работе других физиков, между тем как накопление новых опытных материалов, казалось бы, диктует настоятельную необходимость, так сказать, реконструировать наши представления об «электрическом

[1] «Социалистическая реконструкция и наука», 1932, № 3.
[2] Faraday. Experimental Researches in Electricity. § 3303.

«токе» и попытаться вложить в этот старый термин новое содержание, более соответствующее действительности.

Необходимость коренного пересмотра наших основных представлений об электрическом токе вполне ясно ощущал также Энгельс, который в своей «Диалектике природы» заканчивает главу, посвященную электричеству, следующими словами: «И действительно, учение о гальванизме, а за ним и учение о магнетизме и статическом электричестве может получить твердую основу только в химически-точной генеральной ревизии всех традиционных не проверенных, основывающихся на оставленной наукой точке зрения, опытов и в тщательном исследовании превращения энергии, с устранением на время всех традиционных теоретических представлений об электричестве». (Разрядка автора настоящей статьи.)

Приведенные строки были написаны Энгельсом в период 1878—1882 гг. Он пришел к своему заключению на основании критического рассмотрения, главным образом, области электрохимических явлений и, собственно говоря, совершенно не касался явлений электромагнитных, которые дали Фарадею повод высказать мнение, приведенное выше. Энгельс совершенно самостоятельно пришел к констатированию неудовлетворительности установившихся воззрений на сущность электрических и магнитных явлений. Тем ценнее это полное совпадение основных выводов Фарадея и Энгельса, которые оба стремились при анализе явлений природы возможно более освободиться от предвзятых точек зрения и оба в высокой степени ясно сознавали, насколько вредно для прогресса науки слепое подчинение традиции.

Цель настоящей статьи заключается в некоторой систематизации современных и старых материалов, которые необходимо принять во внимание при пересмотре вопроса об электрическом токе.

3. Во всем дальнейшем мы будем строго придерживаться фарадее-максвелловской точки зрения, допускающей actio in distans, т, е. действие на расстоянии, только в качестве формально-математического метода описания физических явлений и признающей, что на самом деле все взаимодействия в реальном мире физических явлений и, в частности, электрические и магнитные взаимодействия совершаются не иначе, как при непременном участии среды, окружающей взаимодействующие центры и находящейся между ними. Вопрос о правильности фарадее-максвелловской точки зрения и о ее соответствии тому, что совершается в действительности, имеет принципиальное значение. До последнего времени, однако, в физике точка зрения actio in distans имеет еще очень много приверженцев. Так, например, общераспространенная электронная теория, рассматривает действие на расстоянии как первичное физическое явление и, вообще говоря, не считается с участием промежуточной среды. Непримиримость этих двух точек зрения весьма рельефно выявилась, между прочим, во время трех диспутов на тему о природе электрического тока, имевших место в 1929 и 1930 гг. в стенах Ленинградского политехниче-

ского института. [1] С целью возможно глубже вскрыть истинные корни существующих разногласий автор настоящей статьи, принимавший участие в упомянутых диспутах, сформулировал в развитие высказывавшихся им ранее мыслей нижеследующие десять вопросов:

Вопрос 1. Может ли физическое явление [2] протекать вне пространства и времени?

Вопрос 2. Может ли физическое явление протекать без всякого участия в нем какой-либо физической субстанции, представляющей собою носителя свойств, обнаруживаемых в явлении?

Вопрос 3. Может ли физическая субстанция не иметь пространственного распределения?

Вопрос 4. Может ли физическая субстанция в целом или отдельные ее части, сколь бы малы они ни были, не занимать никакого объема?

Вопрос 5. Можно ли рассматривать энергию, как нечто, не являющееся ни самостоятельной физической субстанцией, [3] ни каким-либо состоянием или свойством некоторой физической субстанции?

Вопрос 6. Может ли энергия (в том или ином ее понимании) не иметь пространственного распределения?

Вопрос 7. Может ли какая-либо физическая субстанция или энергия возникнуть в некотором объеме из ничего или превратиться в. ничто?

Вопрос 8. Может ли физическая субстанция или энергия возникнуть а объеме, в котором их не было, или прекратить существование в объеме, в котором они перед тем были, иначе как путем пространственного перемещения извне внутрь этого объема или изнутри этого объема наружу?

Вопрос 9. Может ли некоторое тело (например, наэлектризованное) притти) в движение в связи с приближением к нему другого тела: (также, например, наэлектризованного), если при этом энергия ни в каком виде не притекает извне в объем, занимаемый первым телом?

Вопрос 10. Может ли точка зрения «actio in distans», т.-е. «действия на расстоянии», рассматриваться не как математический метод, пригодный для формального описания какого-либо физического явления, а как основное воззрение, имеющее непосредственное отношение к существу физического явления?

---

[1] См. стенограмму этих диспутов в журнале «Электричество», 1930, №№ 3, 8 и 10,

[2] Во избежание разного рода философских дебатов на тему о том, что мы должны разуметь под термином «физическое явление», условимся иметь в виду явления, трактуемые, например, в пяти томах «Курса физики» О. Д. Хвольсона.

[3] Категорически, конечно, отрицая самостоятельное существование энергии: (без материи), автор счел целесообразным допустить такую формулировку в вопросе 5 для того, чтобы сосредоточить внимание только на «физическом действии на расстоянии» и чтобы не дать возможности защитникам этой псевдофизической точки зрения как-либо уклониться в сторону от основной: цели, преследуемой данными вопросами 1—10. (Примечание, добавленное в 1939 г.).

121

Совокупность безоговорочных и четких ответов «нет» на все десять вопросов выражает собою признание участия промежуточной среды, т.-е. принятие фарадее-максвелловской точки зрения. Ответ «да» хотя бы на один из этих вопросов или недостаточно категорический ответ «нет» неизбежно приводит нас прямо или косвенно к допущению действия на расстоянии в качестве первичного явления. Физическая несостоятельность подобного воззрения весьма определенно охарактеризована Ньютоном в нижеследующих словах (см. третье письмо Ньютона к Бентлею): «Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так как одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту без чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому притти. Тяготение должно обусловливаться каким-то агентом, действующим постоянно, согласно известным законам...»

О. Д. Хвольсон в I томе своего «Курса физики» по тому же поводу говорит: «Термином actio in distans, т.-е. действие на расстоянии, обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие...».

В связи со всем вышеизложенным мы имеем достаточное основание решительно отвергнуть точку зрения действия на расстоянии при рассмотрении вопросов, касающихся природы электрического тока. Мы будем трактовать сущность процесса, происходящего в цепи какого-либо электрического тока, исключительно с точки зрения участия промежуточной среды. Полная обоснованность физического содержания этой точки зрения была доказана всей научной деятельностью Фарадея и блестящей математической интерпретацией его идей, данной Максвеллом.

4. «Электрический ток не может быть рассматриваем иначе, как явление кинетическое. Даже Фарадей, который постоянно стремился освободить свою мысль от влияния представлений, невольно вызываемых выражениями «электрический ток» и «электрическая жидкость», говорит об электрическом токе как «о чем-то продвигающемся, а не о простом расположении». [1] Этими строками Максвелл начинает § 569 своего «Трактата об электричестве и магнетизме». Действительно, представление об электрическом токе как о физическом явлении, в котором мы имеем дело с каким-то движением, необходимо рассматривать как нечто, наиболее бесспорное из всего того, что мы знаем о природе тока. Максвелл, особенно обстоятельно анализировавший ряд следствий, вытекающих из кинетической природы тока, и опиравшийся при этом на идеи и экспериментальные исследования Фарадея, между прочим, так выражается по поводу движений электро-

[1] Something progressive, and not a mere arrangement (Faraday, Experimental Researches in Electricity. § 283).

магнитного характера, которые происходят в системе (двух) токов: «...Эта движущаяся материя, какова бы она ни была, не ограничивается объемом проводников, несущих два тока, но, вероятно, простирается по всему (пространству, окружающему их».» [1] В высокой степени характерно, что Фарадей, открывший законы электролиза и тем самым, казалось бы, в достаточной степени убедительно показавший, что представление о движении электричества внутри проводника, несущего ток, имеет непосредственное отношение к действительности, все же устремляет свой взор в пространство, окружающее проводник, когда в связи с анализом явлений электромагнитной индукции ищет ответа на вопрос об основных и наиболее общих свойствах электрического тока. Мысль Фарадея очень напряженно работала в указанном направлении, и на этой почве у него возникло представление об особом «электротоническом» [2] состоянии среды в пространстве, окружающем проводник с током, т. с. там, где распределен магнитный поток, органически связанный с током, и где находится вся электрокинетическая энергия тока, в точности равная, как показал Максвелл, энергии этого магнитного потока. Самый проводник, по которому течет электрический ток, Фарадей склонен был рассматривать как «axis of power», т.-е. как некоторую ось, вокруг которой соответствующим образом ориентирован основной энергетический процесс, теснейшим образом связанный с магнитным потоком (самоиндукции или взаимной индукции).

Все современные достижения науки об электромагнитных явлениях в полной мере подтверждают ту существенно важную мысль, что в явлении электрического тока кинетический процесс ни в коем случае не ограничивается объемом проводника, но происходит и в пространстве, его окружающем. Даже более того: молено считать достоверным, что в процессе передачи электрической энергии по проводам доминирующую роль играет именно движение, которое имеет место в диэлектрике, окружающем проводник. Передаваемая энергия течет не внутри проводов, но вдоль проводов через диэлектрик, их окружающий. То движение электричества, которое, несомненно, обычно (при $r \neq 0$) происходит в объеме проводников и которое имеет самую тесную связь с электромагнитным процессом в целом, в отношении передачи электрической энергии, по-видимому, само по себе не играет никакой роли.

5. В полном соответствии с общими идеями Фарадея, Максвелл установил, как известно, принцип непрерывности электрического тока, гласящий, что всякий электрический ток есть процесс, который мы обязательно должны ассоциировать с некоторым замкнутым контуром, являющимся «осью» процесса. Пользуясь обычной терминологией, мы можем сказать, что всякий электрический ток протекает по замкнутой цепи. Токов, протекающих по незамкнутой цепи, не существует. В отдельных случаях нам может казаться, что цепь тока разомкнута,

[1] Maxwell. Treatise on Electricity and Magnetism. § 572.
[2] Faraday. Experimental Researches in Electricity. §§ 60, 71, 231, 242, 3114, 1661, 1728, 3172, 3269.

123

но в действительности, по Максвеллу, этого не бывает. Например, представим себе обычный металлический проводник, концы которого присоединены к обкладкам некоторого конденсатора. При возникновении в какой-либо части металлического проводника постоянной электродвижущей силы по этому проводнику потечет ток, заряжающий конденсатор, и, во все время процесса заряжения его, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, согласно теории Максвелла, будет течь ток электрического смещения в направлении, так согласованном с направлением проводникового тока, что в результате мы будем иметь замкнутую цепь полного тока в рассматриваемой системе. Когда упругая деформация электрического смещения в диэлектрике достигнет максимального значения, определяемого величиной электродвижущей силы, ток смещения прекратится. В тот же момент прекратится и проводниковый ток, так как разность потенциалов между обкладками конденсатора сделается по абсолютной величине равной электродвижущей силе и уравновесит ее. Таким образом, в случае неполной проводниковой цепи при e=const мы не можем получить длящегося сколь угодно долго постоянного тока, как это было бы при наличии полной проводниковой цепи с сопротивлением, не равным нулю. Если, далее, электродвижущая сила в рассматриваемой цепи прекратит свое существование, то упругая деформация смещения в диэлектрике начнет убывать, и это, по теории Максвелла, будет сопровождаться появлением между обкладками конденсатора тока смещения обратного направления, согласованного с обратным током в соединяющем обкладки конденсатора металлическом проводнике. Мы обычно описываем этот процесс, говоря, что конденсатор разряжается. Максвелл установил количественные законы, характеризующие токи электрического смещения. В каждый данный момент сила проводникового тока, протекающего через поперечное сечение металлического проводника, будет в точности равна силе тока смещения, протекающего через поперечное сечение диэлектрика конденсатора, и так как направления этих 'токов всегда строго согласованы, принцип непрерывности тока в цепи будет неизменно соблюдаться.

Ток, протекающий по металлическому проводнику, принято в настоящее время рассматривать как течение электронов в объеме проводника. Получающиеся с этой точки зрения количественные соотношения не подлежат ни малейшему сомнению. Что же касается тока электрического смещения, то мы не умеем описывать его на языке электронной теории. Только в самое последнее время делаются некоторые попытки в этом направлении. [1] Во всяком случае необходимо, в связи с представлением об электрическом смещении считаться со следующими словами Максвелла: [2] «Что бы пи представляло собою электричество и как бы мы ни понимали движение электричества,

[1] Alex. Veronnet. Theorie electrohique de l'ether de la lumiere, de l'ectromagnetisme et de la gravitation. «Revue General de l'Electricite», 1931, t. XXIX, pp. 651 et 702.
[2] Maxwell. Treatise on Electricity and Magnetism. § 62.

124

явление, которое мы назвали электрическим смещением, есть движение электричества в том же смысле, как и перенос определенного количества электричества по проводнику представляет собою движение электричества; различие только в том, что в диэлектрике имеет место сила так называемой электрической упругости, которая действует против электрического смещения и принуждает

электричество двигаться обратно, когда электродвижущая сила перестает действовать; в то же время в проводнике электрическая упругость непрерывно уступает под действием электродвижущей силы, так что возникает действительный проводниковый ток...»

Пуанкаре,[1] излагая теорию Максвелла и касаясь электрического смещении, указывает, что то электричество, которое согласно этой теории мы должны представлять себе смещающимся в процессе установления электрической упругой деформации в эфире, т.-е. в так называемой «пустоте», представляет собою нечто, отличающееся от обычно рассматриваемого электричества. Быть может это и так, а быть может, что более вероятно, намечающаяся теперь эволюция наших представлений о природе электрона приведет к устранению кажущегося различия между двумя видами «электричества». Дело в том, что примитивная электронная теория, отмежевывающаяся от основных идей Фарадея и Максвелла, до последнего времени оперировала с электронами, рассматриваемыми как некоторые элементарные корпускулы, строго ограниченного объема, обладающие врожденной способностью взаимодействовать одна с другой на расстоянии, через ничто. С этой точки зрения, движущиеся электроны представляют собою, так сказать, точечные токи, друг с другом не связанные непрерывно, причем, конечно, не может быть и речи о максвелловском принципе непрерывности тока. Но эта примитивная электронная теория начинает претерпевать метаморфозу, обнаруживающую здоровые симптомы сближения с фарадее-максвелловской точкой зрения, Именно, в связи с развитием волновой механики, с одной стороны, и на основе экспериментальных данных из области дифракции электронов, с другой стороны, вырастает представление об электроне как о некотором центре сложного электромагнитного процесса, происходящего в пространстве. Таким образом, электрон теряет резко очерченные границы, как бы расплывается в окружающем пространстве и по природе своей сближается с тем, что вообще имеет место в этом пространстве, т.-е. в первичной физической субстанции
(эфире).[2]

Принцип непрерывности тока лежит в основе целого ряда важных соотношений, которыми характеризуется электромагнитное поле, и справедливость его в полной мере подтверждается всей совокупностью

[1] H. Poincare. Electricite et Optique, 1901.

[2] Говоря об эфире как о первичной физической субстанции, мы, конечно, должны это понимать в том смысле, что на данном этапе наших физических знаний представление об эфире является некоторым пределом конкретизации наших общих представлений о материи (Примечание, добавленное в 1939 г.).

оправдывающихся на опыте следствий, вытекающих из максвелловской теории. Математическую формулировку этого принципа можно представить в следующем виде:

$$\int_s J \cos \alpha \, ds = 0,$$

где J есть плотность электрического тока в некоторой точке произвольной замкнутой поверхности s, α —угол между вектором тока и внешней, например, нормалью к поверхности в данной точке, а интегрирование производится по всей этой замкнутой поверхности. Следовательно, полный ток сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю; другими словами, сила тока, протекающего сквозь эту произвольно взятую поверхность в направлении снаружи внутрь, в точности равна силе тока, протекающего сквозь соответствующие участки той же поверхности в обратном направлении, т.-е. изнутри наружу.

6. Как известно, всякий электрический ток органически связан с магнитным потоком, который обычно называется потоком самоиндукции. Этот магнитный поток, сцепляющийся с контуром тока, является весьма существенным и совершенно неотъемлемым признаком тока. Можно себе представить электрический ток в проводящей цепи при полном отсутствии электродвижущей силы, при отсутствии электрических сил в объеме проводника и каких бы то ни было разностей потенциалов между отдельными его сечениями, при отсутствии, наконец, обычного течения

электронов в объеме проводника. Мы имеем в виду случай постоянного тока в сверхпроводящей цепи, т.-е. при r=0. Единственным, неизменным и безусловно всегда наблюдаемым признаком тока является его магнитный поток самоиндукции. Представить себе электрический ток, не связанный с магнитным потоком, мы абсолютно не в состоянии. Подобного тока в природе не существует. Так называемый закон магнитодвижущей силы отражает в себе сказанное выше о внутреннем единстве магнитного потока и связанного с ним тока. Закон этот математически формулируется, как известно, следующим образом:

$$\int H \cos \alpha \, dl = 4\pi i,$$

где линейный интеграл магнитной силы H берется вдоль произвольного замкнутого контура и i есть полный ток, проходящий сквозь контур интегрирования в положительном направлении. Если за контур интегрирования избрать контур некоторой магнитной линии потока самоиндукции данной цепи тока, то будем иметь:

$$\cos \alpha = 1,$$

и закон магнитодвижущей силы принимает следующий упрощенный вид:

$$\int H \, dl = 4\pi i$$

Таким образом, наличие тока i эквивалентно наличию потока самоиндукции (Φ_s). Отсутствие потока самоиндукции свидетельствует об отсутствии тока в данной цепи. Это — основное, принципиальное положение. Линейный интеграл магнитной силы вдоль замкнутого контура есть не что иное, как мера силы тока сквозь этот контур. Коэффициент 4π есть случайный результат неудачного выбора единиц, которыми мы обычно пользуемся. Рационализировав эти единицы, можно совершенно исключить 4π из рассматриваемого соотношения. Выражая, например, силу тока в единицах Хевисайда, мы получаем наиболее простую форму соотношения, характеризующего силу тока через физические свойства магнитных линий потока самоиндукции:

$$i = \int H dl$$

Производя же интегрирование вдоль контура, не в точности совпадающего с контуром магнитной линии, мы в хевисайдовых. единицах получаем:

$$i = \int H \cos \alpha \, dl$$

Однако, в силу чисто исторических причин эту же силу тока мы обычно выражаем скоростью протекания электричества через любое поперечное сечение цепи тока и пишем:

$$i = \frac{dq}{dt},$$

имея в виду, в «случае проводникового тока, количество электричества, суммирующееся из зарядов электронов и ионов, текущих по цепи. Односторонность и даже возможную ошибочность такого взгляда на явление, называемое электрическим током, мы попытаемся в дальнейшем выяснить.

7. Представление о магнитном потоке явилось результатом работ Фарадея, которого мы по существу должны считать основателем учения о физических свойствах магнитного потока вообще. С самого начала и до последних дней своей научной деятельности он не переставал всесторонне исследовать природу магнитного поля и, базируясь на категорическом отрицании действия на расстоянии, он пришел к представлению о «физических силовых линиях» магнитного поля, которые мы можем в дальнейшем называть просто магнитными линиями. В полном соответствии с представлениями Фарадея мы будем разуметь под термином «магнитная линия» реально существующий нитеобразный элемент магнитного потока, т.-е. элементарную трубку магнитной индукции. Согласно Кельвину и Максвеллу, при математическом описании магнитного поля в качестве такой элементарной трубки фигурирует единичная трубка магнитной индукции. Итак, если придерживаться фарадее-максвелловской точки зрения, то мы обязаны представлять себе магнитное поле как пространство, в котором распределен реально существующий магнитный поток, являющийся совокупностью магнитных линий. Замечательно, что все основ-

127

ные свойства магнитных линий в высокой степени подобны свойствам гельмгольцевских вихревых нитей в безграничной идеальной жидкости. По Кельвину и Максвеллу, магнитные линии представляют собой именно некоторые вихревые нити.

На основании своих многочисленных экспериментов Фарадей установил принцип непрерывности магнитного потока, согласно которому каждая магнитная линия образует неизменно замкнутый контур. В разного рода электродинамических процессах магнитные линии могут претерпевать какие угодно преобразования,[1] но только не разрыв. Физика не знает случаев, когда мы имели бы дело с незамкнутым контуром магнитной линии, с обнаженными концами ее. Таковые концы магнитных линий мы должны были бы воспринимать как действительные магнитные полюсы, но их не существует в природе, и самая мысль об этом представляется в настоящее время абсурдной.

Со стороны некоторых современных физико-математиков, не стоящих на фарадеевской точке зрения, делаются попытки формально опровергнуть принцип непрерывности магнитного потока. Так, например, Я. Н. Шпильрейн [2] в одной своей работе, посвященной этому вопросу, приходит к заключению, что с формальной точки зрения возможно себе представить случай, когда магнитная линия не будет замкнута и когда, следовательно, будет иметь место разрыв ее. Он при этом не договаривает, что в таком случае мы будем иметь дело с реальный магнитным полюсом. Все рассуждения Я. Н. Шпильрейна по существу сводятся к утверждению, что отношение между силами двух токов может непрерывно изменяться как угодно и, в частности, может быть иррациональным числом, т.-е. числом, которое не является отношением между какими-либо двумя целыми числами. Это эквивалентно утверждению, что сила тока ни в коем случае не квантуется и может принимать какие угодно значения. В настоящее время подобное утверждение в высокой степени рискованно и, по-видимому, оно совершенно не соответствует природе явлений. Наоборот, анализ электромагнитных явлений привел современную физику к представлению о квантовании как об основном моменте разного рода процессов, относящихся к этой области, и потому трудно себе представить, чтобы явление, называемое нами электрическим током, было изъято из закона квантования.

Объективно подходя к оценке установленного Фарадеем представления о реально существующих нитеобразных элементах магнитного потока, мы должны будем признать, что физическое содержание этого представления в целом именно является первым по времени указанием на квантование в области электромагнитных явлений, и все, что за последнее время сделано наукой в этом отношении,

---

[1] В. Ф. Миткевич. О преобразованиях магнитного потока. Доклады Академии Наук СССР, Л, 1929, стр. 131.

[2] Jean Spielrein Uber ungeschlossene Wirbellinien, «Archiv fur Eleklrotechnik», B. XVIII, 1927, S. 366. См. также: И. Е. Тамм. «Основы теории электричества», т. I, 1929, стр. 228, 229 и 230.

128

является по существу лишь дальнейшим логическим развитием того миропонимания, фундамент которого был заложен трудами Фарадея, Как показал Максвелл, магнитный поток в целом играет роль некоторого момента количества движения во всяком электрокинетическом процессе. Условной единичной трубке магнитной индукции мы должны приписать электрокинетический момент количества движения, равный единице. Конечно, реально существующей магнитной линии мы должны приписать некоторый иной, но тоже неизменный, момент количества движения, который гораздо меньше единицы, принимаемой в абсолютной электромагнитной системе. Замечательно, однако то, что этот элементарный момент количества движения абсолютно не зависит от формы и размеров данной замкнутой магнитной линии. Это есть некоторая определенная константа, которая характеризует физическую сущность магнитной линии. Трудно отрешиться от мысли, что не простой лишь случайностью объясняется то обстоятельство, что планковская постоянная h также имеет характер некоторого элементарного момента количества движения. Это знаменательное совладение было впервые отмечено М. В. Шулейкиным.

8. В области теоретической механики мы начинаем с изучения движений материального тела в пустоте, т.-е. при полном отсутствии какой-либо среды, могущей оказывать сопротивление движению тела.

В таком случае свойства материальной инерции выступают особенно рельефно и мы можем в самом чистом виде изучать различные основные проявления кинетической энергии движущегося тела. Это есть простейший случай движения материальной системы, причем постоянная скорость движения может иметь место только при полном отсутствии приложенной к телу внешней механической силы (движущей силы). В достаточной степени освоившись со всем, что происходит при отсутствии сопротивления среды, мы затем с полным сознанием всех существенных сторон этого процесса переходим к рассмотрению случая движения материального тела в какой-либо среде, наличие которой сильно изменяет общие условия изучаемого движения. Мы знаем, в частности, что в этом случае для получения постоянной скорости движения необходимо приложить к телу непрерывно действующую постоянную движущую силу. Если бы мы начинали изучать движение материального тела, исходя из случая достаточно вязкой среды, в которую помещено рассматриваемое тело, то основные законы динамики материальной системы были бы в высокой степени замаскированы привходящими обстоятельствами, связанными с сопротивлением среды, и потребовались бы значительные усилия для того, чтобы суметь отвлечься от различных вторичных сопровождающих явлений и выдвинуть на первый план принципиальные свойства движущейся системы. К счастью, наблюдение многих явлений природы и надлежащим образом поставленный эксперимент позволяют нам без всяких затруднений исследовать реальный процесс движения материального тела при отсутствии или, точнее сказать, при почти полном отсутствии сопротивления среды. Мы привыкли совершенно отчетливо разбираться в основных законах динамики, исходя из

129

простейших случаев. Но если бы человечество существовало в некоторой достаточно вязкой среде, от которой оно не умело бы освободиться и за пределами которой оно не могло бы ничего наблюдать, то весьма возможно, что, изучая движение материального тела в обычной обстановке, мы привыкли бы смотреть на добавочные движения сопротивляющейся среды и на обусловленный наличием среды постоянный расход энергии при движении в ней некоторого тела как на существенную и принципиально неотъемлемую сторону изучаемого движения. Нечто в высокой степени аналогичное мы можем констатировать в отношении наших традиционных представлений об электрическом токе, протекающем, например, по некоторой проводниковой цепи, сопротивление которой обычно не равно нулю. Мы очень склонны рассматривать как нечто весьма существенное и имеющее принципиальное значение в вопросе о природе тока то движение электронов, которое несомненно имеет место в объеме обыкновенного проводника и обусловливает выделение джоулева тепла. Нам чрезвычайно трудно отказаться от подобной точки зрения, и это кажется совершенно невозможным. Все это происходит вследствие того, что до последнего времени мы не знали проводников, лишенных способности преобразовывать энергию электромагнитного процесса в тепло, т.-е. в энергию беспорядочного движения элементов вещества в объеме проводника. Мы привыкли рассуждать только о таком токе, который нагревает проводники цепи, и создали терминологию применительно к данной обстановке, благодаря чему нам очень трудно отрешиться от установившихся взглядов, когда мы пытаемся понять основные процессы, происходящие в простейшем случае электрического тока, т.-е. тока в сверхпроводнике.

В настоящее время проводник, у которого $r=0$, не есть нечто воображаемое, нереальное. В 1911—1914 гг. Камерлинг-Оннес открыл, что некоторые металлы (например, ртуть, свинец и др.), будучи сильно охлаждены, до температуры всего лишь в несколько градусов от абсолютного нуля, внезапно делаются сверхпроводящими, т.-е. их электрическое сопротивление становится практически равным нулю. В цепи, составленной из сверхпроводников, Камерлинг-Оннесу удалось возбудить ток, который затем при полном отсутствии какой бы то ни было электродвижущей силы сохранялся, практически не ослабевая, в течение ряда часов. Таким образом, теперь уже есть возможность получать самый настоящий электрический ток в сверхпроводящих цепях. Это несомненно есть

наиболее простой случай электрокинетического процесса, называемого током. Ясно, конечно, что основные свойства электрического тока должны выявляться на этом простейшем случае весьма рельефно, не будучи замаскированы привходящими обстоятельствами. Следовательно, именно на токе в сверхпроводящей цепи необходимо сосредоточить наше внимание, если мы считаем своевременным пересмотреть вопрос о природе тока и по возможности приблизиться к пониманию того, что имеет особо существенное значение в этом электромагнитном явлении.

9. Вопрос об электрическом токе в сверхпроводящем слое был

130

в общих чертах рассмотрен еще Максвеллом.[1] Сущность основных положений, установленных им, можно сформулировать следующим образом.

а) Нормальная составляющая магнитной индукции сохраняет постоянное значение во всех точках сверхпроводящего слоя.

б) Если сверхпроводящий слой образует замкнутую поверхность, никакие изменения магнитного поля вне этой поверхности не могут влиять на величину магнитной индукции внутри объема, ограничиваемого этой поверхностью.

в) Объем, ограниченный со всех сторон сверхпроводящим слоем, оказывается совершенно непроницаемым для магнитных линий внешнего (по отношению к данному объему) потока.

Через 40 лет после установления Максвеллом этих положений они были полностью подтверждены непосредственными опытами Камерлинг-Оннеса, которому удалось, наконец, реально осуществить сверхпроводник.

Как непосредственное следствие результатов, к которым пришел Максвелл, и в полном согласии с экспериментальными достижениями Камерлинг-Оннеса, мы можем к трем вышеприведенным положениям добавить еще следующие положения.

г) Если некоторый объем заполнен сверхпроводящим веществом, во всех точках этого объема магнитная индукция и магнитная сила неизменно сохраняют свою величину, т.-е. имеют место соотношения:

B = const H = const.

д) Магнитный поток, сцепляющийся с некоторым контуром, полностью состоящим из сверхпроводника, неизменно сохраняет свою величину и не может быть изменен никакими физическими воздействиями. [2]

10. Анализируя различные случаи электрического тока, «протекающего» по сверхпроводнику, мы встречаемся с целым рядом обстоятельств, не вполне гармонирующих с нашими традиционными представлениями об этом электрокинетическом процессе. В случае сверхпроводников особенно ярко выступает на первый план роль магнитного потока самоиндукции, как некоторого основного фактора, определяющего собою общий характер процесса, называемого электрическим током. Исходя из рассмотрения потока самоиндукции, мы всегда можем элементарно просто получить количественные соотношения, которыми определяется электрический ток в сверхпроводя-

---

[1] Maxwell. Treatise on Electricity and Magnetism. §§ 654, 655.

[2] Lippmann. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences (Paris), t. 168, 1919, p. 73; В. Ф. Миткевич. О природе электрического тока. Труды 8-го Всеросс. электр. съезда, 1921, вып. I, стр. 99. Перепечатка в журнале «Телеграфия и телефония без проводов», 1922, № 15, См. также: Второй диспут о природе электрического тока, журнал «Электричество», 1930, № 8 и «Физические основы электротехнику», 3-е изд., 1933, стр. 119 и 120.

131

щей цепи. Сказанное полностью приложимо и к основному опыту Камерлинг-Оннеса, который индуктировал ток в замкнутой сверхпроводящей цепи (из свинцовой проволоки). До охлаждения этой проволоки, т.-е. когда сопротивление ее еще не было равно нулю, он располагал замкнутую цепь во внешнем магнитном поле так, чтобы с; нею сцеплялся определенный поток Φ_0. Проволока далее охлаждалась до температуры кипящего гелия, причем сопротивление ее становилось равным

нулю, и затем сверхпроводящая цепь удалялась от источника внешнего магнитного поля, Магнитный поток, сцепляющийся с контуром проводника, при этом сохраняется неизмененным по своей величине, но только теперь Он воспринимается наблюдателем как поток самоиндукции (Φ_s), связанный с индуктированным током i. Обозначая коэффициент самоиндукции цепи через L, мы можем, таким образом, написать:

$$\Phi_s = \Phi_0 = Li,$$

откуда получаем;

$$i = \frac{\Phi_s}{L}.$$

Это есть простейший и совершенно точный метод определения силы тока, индуктированного в сверхпроводящей цепи.

.....
.....
.....

18. Необходимо обратить особенное внимание на то обстоятельство, что движение электронов и ионов в объеме проводника имеет непосредственно отношение, по-видимому, только к процессу преобразования электромагнитной энергии в джоулево тепло. Приращение кинетической энергии частиц вещества проводника следует рассматривать именно как результат движения электронов и ионов под влиянием и за счет притекающей к проводнику электромагнитной энергии. Если в проводнике джоулево тепло не выделяется, то нет никаких оснований говорить об особом движении электронов и ионов при прохождении тока. Следовательно, надо полагать, что в случае электрического тока в сверхпроводящей цепи, когда джоулево тепло, не выделяется, отсутствует и соответствующее движение электронов вдоль цепи. В таком случае становится понятным, почему электронная «теория оказалась совершенно несостоятельной при объяснении явлений, протекающих в сверхпроводниках. По всей вероятности, явления эти выходят из рамок того, что может быть формально описано на языке электронной теории, область которой при описании электрической проводимости ограничивается случаями, когда выделяется джоулево тепло, т.-е. когда сопротивление цепи не равно нулю.

В связи со всем вышеизложенным можно высказать и некоторые предположения относительно вопроса о критическом магнитном поле и о критической силе тока, при которых сверхпроводник теряет свои особенные свойства и начинает нагреваться под действием тока. Весьма возможно, что по достижении указанных критических значений

132

тока и магнитного поля создаются условия, при которых силы, стремящиеся привести в движение электроны вдоль сверхпроводящей цепи, оказываются в состоянии преодолеть силы, удерживающие эти электроны в атомных группировках, и начинают увлекать их в соответствии с тем специфическим движением, которое присуще реально существующим нитевидным элементам магнитного потока самоиндукции, представляющим собою, по Максвеллу, некоторые вихревые нити.

19. Обращаясь к энергетической стороне явления, называемого электрическим током, необходимо, прежде всего, отметить, что мы никоим образом не будем в состоянии вычислить величины электрокинетической Энергии T_e, которою обладает данная цепь тока i, если будем иметь дело лишь с объемом проводника и движущимися в пределах этого объема электронами и ионами. Для вычисления T_e безусловно необходимо оперировать с пространством, окружающим проводник, т.-е. с тем пространством, в котором распределен магнитный поток самоиндукции, играющий с фарадее-максвелловской точки зрения основную роль в процессе тока и являющийся именно носителем всей его электрокинетической энергии T_e. Эта энергия T_e как раз в точности равна магнитной энергии потока самоиндукции, вследствие чего всегда имеет место соотношение:

$$T_e = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \Phi_s i = \frac{1}{8\pi} \int_v \mu H^2 \, dv,$$

где интегрирование должно быть распространено по всему общему, занятому потоком самоиндукции.

Электронная теория, имеющая ряд несомненных и весьма ценных достижений в некоторых областях, оказывается абсолютно бессильной решении задачи о вычислении T_e, если, вопреки явным указаниям фарадее-максвелловской теории, она настаивает на том, что процесс электрического тока ограничивается явлениями, происходящими в объеме проводника, и не имеет принципиального отношения к каким-либо обстоятельствам вне этого объема. Такая электронная теория неизбежно должна рассматривать движение электромагнитной энергии вдоль линии передачи от генераторной станции к приемным устройствам как процесс переноса энергии электронами, движущимися внутри проводов через их поперечное сечение, подобно тому, что будет иметь место в случае передачи энергии, например, по паропроводу или по водопроводной трубе. Эта схема электронной передачи энергии находится в полном противоречии с результатами работ Пойнтинга, который показал, в развитие теории Максвелла, что электромагнитную энергию мы должны считать передающейся не внутри проводов, а вдоль проводов через диэлектрик, окружающий эти провода, играющие лишь роль направляющих (axis of power, по Фарадею). Пойнтинг показал, что джоулево тепло, выделяющееся в объеме некоторого участка проводника, образуется в нем не за счет энергии, притекающей через ограничивающие этот объем сечения проводника, а за счет проникающей через его боковую поверхность

133

части электромагнитной энергии, передаваемой вдоль проводника через пространство, его окружающее. Полная точность количественных результатов теории Пойнтинга не подлежит ни малейшему сомнению. Если представить себе, что провода линии передачи совершенно не обладают способностью нагреваться при прохождении тока, т.-е. если линия будет состоять из сверхпроводников, то выводы, к которым пришел Пойнтинг, становятся самоочевидными. В этом случае физически немыслим реальный процесс передачи энергии иначе, как именно через диэлектрик, окружающий сверхпроводники.

После всего того, что было сказано выше, нельзя не признать, что термин «электронный транспорт», начинающий в последнее время входить в употребление для обозначения электрической передачи энергии, является результатом глубокого недоразумения, основанного на полном игнорировании всего того, что сделано Фарадеем, Максвеллом и Пойнтиигом. Как можно электрическую передачу энергии называть «электронным транспортом», когда объем проводника линии передачи с движущимися в нем электронами является только своего рода кладбищем электромагнитной энергии, как таковой! Если «электронный транспорт» и играет некоторую роль при передаче энергии, так только в качестве паразитного процесса, который обусловливает тепловые потери в линии передачи и понижает коэффициент полезного действия установки.

20. Цель настоящей статьи ограничивалась лишь тем, чтобы возможно более обнажить ряд недоразумений, вытекающих из наших традиционных представлений об электрическом токе, и показать, что мысль о вероятной ошибочности этих представлений имеет достаточные основания. Будущим исследователям в области электромагнитных явлений предстоит сделать еще не мало в направлении дальнейшего физического анализа этих явлений и вскрытия истинной природы электрического тока. В этом отношении особенно важно надлежащим образом согласовать фарадеевскую идею о реально существующих магнитных линиях с представлениями Максвелла об электрическом смещении, стационарном и изменяющемся. Во всяком случае, весьма трудно отказаться от убеждения в том, что основные физические воззрения Фарадея и Максвелла представляют собою верную путеводную нить, следование которой должно будет в конце концов, дать нам ключ к пониманию сущности того, что принято называть «электрическим током».

X

ОБ ОТВЕТАХ М. Л. ШИРВИНДТА И Ю. П. ШЕИНА ПО ПОВОДУ ДЕСЯТИ ВОПРОСОВ [1]

1. Редакция ЛЭМИ обратилась к ряду лиц— главным образом, к физикам и к теоретикам диалектического материализма — с просьбою дать свой ответ на мои 10 вопросов [2] или высказаться

более подробно по их существу и постановке. Под этим углом зрения я и буду рассматривать присланные пока только два ответа М. Л. Ширвиндта и Ю. П. Шеина. Тот факт, что они оба сочли необходимым в той или иной форме дать ответы на все мои 10 вопросов, доказывает отсутствие каких-либо принципиальных неправильностей в постановке этих вопросов, или чего-либо неприемлемого по существу. Таким образом, получение от М. Л. Ширвиндта и Ю. П. Шеина ответов на 10 вопросов, совершенно независимо от содержания этих ответов, позволяет мне думать, что формулировка моих вопросов целесообразна и не содержит ничего, противоречащего тому направлению философской мысли, которое представляется мне единственно правильным при рассмотрении природы физических явлений.

2. И М. Л. Ширвиндт, и Ю. П. Шеин в отношении всех десяти вопросов присоединяются к моим отрицательным ответам («нет»). Ясно, конечно, что на мой 5-й вопрос М. Л. Ширвиндт отвечает именно «нет». Ведь я спрашиваю: «Можно ли рассматривать энергию как нечто, не являющееся ни самостоятельной физической субстанцией, ни каким-либо состоянием или свойством физической субстанции?» М. Л. Ширвиндт отвечает: «Энергия не является субстанцией. Энергия — качество материи, определенная форма ее активности». Следовательно, он признает, что энергия не есть что-либо третье, мною не предусмотренное, т.-е. он отвечает «нет». Указание М. Л. Ширвиндта, что формулировка моего 9-го вопроса представляется ему «не вполне ясной», совершенно непонятна. Ведь то обстоятельство, что он счел необходимым ответить на 9-й вопрос именно «нет», а не «да» и не нашел оснований уклониться от четкого ответа показывает, что вопрос достаточно ясен в тех пределах, которые

---

[1] ЛЭМИ, Труды Ленинградского электромеханического института, 1934, № 1, стр. 3.

[2] См. настоящий сборник, статья IX.

необходимы для принципиального признания неприемлемости «действия на расстоянии» в качестве первичного физического явления. Суть в том, что при формулировке своих вопросов я старался сообщить им характер возможно более общий для того, чтобы дать повод познакомившемуся с этими вопросами и попытавшемуся ответить на каждый из них подойти к некоторым принципиальным установкам, совершенно независимо от его представлений, относящихся к менее существенным деталям, к рассмотрению каковых необходимо затем, конечно, обратиться.

3. Опубликовав свои 10 вопросов, я сопроводил их следующими словами: Ответ «да» на любой из десяти вопросов или недостаточно категорический ответ «нет», хотя бы на один из этих вопросов, неизбежно приводят нас к допущению действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. [1]

Ответы М. Л. Ширвиндта и Ю. П. Шеина служат прекрасной иллюстрацией справедливости моего вышеприведенного утверждения. Дело в том, что их ответы «нет» сопровождаются рядом соображений, имеющих характер оговорок, что неминуемо в конце концов, приводит обоих авторов этих оговорок к большей или меньшей реабилитации «действия на расстоянии». Напоминаю: речь идет не о чем либо ином, а именно о том, можно ли рассматривать «действие на расстоянии» как первичное физическое явление, т.-е. как то основное явление, с которым вообще безусловно необходимо считаться при суждении о природе физических процессов.

М. Л. Ширвиндт справедливо указывает, что представление об участии промежуточной среды встречает не мало трудностей при последовательном его проведении для объяснения физических явлений. Главное затруднение он видит в том, что мы не обладаем еще достаточным знанием свойств эфира, без признания которого, по его мнению, мною вполне разделяемому, обойтись невозможно. Он говорит по данному поводу: «Словом, мы пока не располагаем данными, позволяющими сконструировать физическое понятие эфира». На основании этого он считает необходимым указать: «В этом сила теории дальнодействия, при всей ее внутренней слабости и описательной беспомощности». Так как мною были поставлены вопросы именно с очевидною целью выявить физическую неприемлемость точки зрения «действия на расстоянии», то оговорки М. Л. Ширвиндта

я не могу понять иначе, как признание того, что несмотря на «внутреннюю слабость и описательную беспомощность», эта точка зрения все же имеет пока некоторое право на признание при рассмотрении природы физических явлений. Правда, М. Л. Ширвиндт все-таки полагает, что бороться с этою точкою зрения нужно, но не так, как это делаю я, когда доказываю ее физическую несостоятельность, т.-е., выра-

[1] В. Ф. Миткевич. «Физические основы электротехники», Кубуч, 1932. Предисловие ко 2-му изданию. Та же мысль и почти в тех же словах выражена и в статье «К вопросу о природе электрического тока», «Социалистическая реконструкция и наука», 1932, № 3, стр. 43 (См. статью IX настоящего сборника.)

136

жаясь языком Ньютона, ее физическую абсурдность. Конечно, я буду чрезвычайно признателен теоретикам диалектического материализма за помощь, которую они мне окажут в борьбе с точкой зрения физического «действия на расстоянии», но только в том случае эта помощь будет действительной, если они вместо того, чтобы давать мне полезные по их мнению советы, сами откроют серьезную борьбу против этой точки зрения и поведут такую борьбу, быть может, более успешно, чем я. Но пока этого нет, я считаю рассуждения М. Л. Ширвиндта некоторой, хотя и очень осторожной, попыткой реабилитировать «действие на расстоянии».

Гораздо более определенно высказывает свои соображения Ю. П. Шеин. С одной стороны, он присоединяется к ответам «нет» на все поставленные мною 10 вопросов, с другой же стороны, он считает необходимым добавить «по...», за которым следует длинный ряд соображений, последовательно приводящих его к весьма четкой реабилитации «действия на расстоянии». Еще раз повторяю, что речь идет об основном физическом воззрении, а не о методах математического анализа физических явлений. Ю. П. Шеин признает, что я правильно делаю, подчеркивая противоположность двух концепций: фарадеевской точки зрения и точки зрения «действия на расстоянии». Однако здесь же он добавляет: «Но нужно было бы подчеркнут также и то, что факты современной физики, как и общий диалектический взгляд, требуют того, чтобы эти противоположности были преодолены и синтезированы. Не «либо» среда, «либо» свойства самих тел, но иная постановка проблемы, которая синтезировала бы оба противоположных утверждения в высшем органическом единстве — по-видимому единственно соответствует действительности».

Что касается «фактов современной физики», требующих синтеза точек зрения «действия на расстоянии» и фарадее-максвелловской, то я решительно ничего не слыхал о подобных фактах. Мне они представляются совершенно невероятными. Если бы Ю. П. Шеину действительно удалось найти такие факты, то это надо было бы признать исключительно важным открытием, расширяющим границы физики и вводящим в ее область ряд новых явлений, которые мы до сих пор не склонны были называть физическими. Пока же он не опубликует точных данных об открытых им фактах, я буду иметь право утверждать, что ссылка на них совершенно не обоснована.

Теперь остановимся на своеобразном понимании Ю. П. Шеиным общего диалектического подхода к трактовке рассматриваемых противоположностей. Кто может возражать против того, что синтез противоположностей есть очень мощное орудие анализа процессов, происходящих в природе? Но нельзя же без особых размышлений, так сказать автоматически, стремиться синтезировать всякие противоположности! Быть может, с очень общей философской точки зрения и допустимо синтезировать любые противоположности независимо от их содержания, но если мы имеем в виду определенный круг явлений или представлений, то по-видимому следует считаться с некоторыми ограничениями. Так, например, можно ли, имея в виду область мате-

137

матического анализа, синтезировать правильное решение какого-либо уравнения и неправильное решение того же уравнения? Или же, оперируя с тою же областью математики, можно ли синтезировать противоположные утверждения: $\cos\varphi<1$ и $\cos\varphi>1$? Вообще, можно

ли и нужно ли синтезировать всякое справедливое утверждение и противоположное ему несправедливое утверждение? Можно ли и нужно ли синтезировать точку зрения, имеющую отношение к природе физических явлений, и точку зрения, являющуюся в этом отношении абсурдной? Ведь не может быть сомнения в том, что точка зрения Фарадея и Максвелла имеет непосредственное отношение к действительно происходящим процессам и, в то же время, точка зрения «действия на расстоянии», в качестве чисто физического воззрения, не может быть квалифицирована иначе, как физический абсурд.[1] Зачем же их синтезировать в условиях, когда мы говорим именно о природе физических явлений? Эти противоположные точки зрения можно, однако, синтезировать, имея, например, в виду методы математического анализа физических явлений. Как известно, такого рода синтез и был уже выполнен Максвеллом, в его «Трактате об электричестве и магнетизме», где он с полной убедительностью показывает, что обе точки зрения, надлежащим образом использованные, в ряде случаев приводят к одним и тем же результатам (в виду их внутреннего единства в математическом отношении). Выдвигать же требование подобного синтеза в связи с ответами на формулированные мною 10 вопросов — это, по моему мнению, в высокой степени ошибочно. Вопреки указаниям Ю. П. Шеища я полагаю, что при суждении о природе физических явлений не может быть и речи о каком-либо синтезе точек зрения «действия на расстоянии» и фарадее-максвелловской. Либо одно, либо другое. В данном случае эти точки зрения абсолютно непримиримы и совершенно исключают одна другую. Для физика иного выхода нет и быть не может. Неужели физик при исследовании природы явлений должен синтезировать элементы материалистического и идеалистического мировоззрений? Допустимо ли вообще с диалектической точки зрения требование синтеза таких двух типичных противоположностей, как материализм и идеализм? Быть может, как я уже указывал выше, с общефилософской точки зрения это и представляет некоторый интерес, но я утверждаю, что в области физики подобный синтез ничего не дает, кроме полного хаоса в самых существенных наших представлениях, и никоим образом не может содействовать изживанию того кризиса, который так остро чувствуется в настоящее время.

Итак, в рассуждениях Ю. П. Шеина есть несомненная ошибка, возникшая на почве слишком прямолинейного понимания директив одного из основных положений диалектики (о синтезе противополож-

[1] См., например, В, Ф. Миткевич. Основные воззрения современной физики. Речь, читанная в торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 года. (См. настоящий сборник, статья II.)

костей), что и привело его к признанию точки зрения «действия на расстоянии» в качестве физического воззрения.

Диалектика нас этому не учит. Наоборот, диалектический подход к физическим явлениям требует от нас самого тщательного анализа трактуемой проблемы.

В связи со всем вышеизложенным невольно вспоминаются слова В. И, Ленина: «Самое верное средство дискредитировать новую политическую (и не только политическую) идею и повредить ей состоит в том, чтобы во имя защиты ее довести ее до абсурда. Ибо всякую истину, если ее сделать «чрезмерной»..., если ее распространить за пределы ее действительной применимости, можно довести до абсурда, и она даже неизбежно, при указанных условиях, превращается в абсурд». [1]

4. М. Л. Ширвиндт и Ю. П. Шеин, в связи со своими ответами по поводу моих 10 вопросов, высказывают мнение, что я борюсь с идеализмом в физике, исходя из механистических воззрений. Термин «механистическое» в последнее время очень часто применяется и кстати, и не кстати. Разговор о механистичности моих воззрений, по моему мнению, не имеет никакого отношения к сути дела, т.-е. сформулированным мною 10 вопросам. Интересно знать, где именно и в чем именно М. Л. Ширвиндт и Ю. П. Шеин нашли в моих вопросах нечто, свидетельствующее о механистичности моих исходных позиций. Отсутствие определенных и ясных указаний по этому поводу позволяет мне считать их утверждение бездоказательным и голословным, подобно тому, как, например, было бы

совершенно голословным мое простое, ничем не подкрепленное утверждение, что в ответе Ю. П. Шеина по поводу моих вопросов я имею основание усматривать элементы идеалистического мировоззрения.

Во всяком случае, чрезвычайно непонятным является то обстоятельство, что и М. Л. Ширвиндт и Ю. П. Шеин все же не могли Совсем воздержаться от ответов на мои 10 вопросов, несмотря на их якобы «механистичность», а сочли себя вынужденными, так или иначе, присоединиться к моим «нет». Я в праве из этого заключить, что в моих 10 вопросах содержится нечто более общее и более существенное, чем простое отражение какой-либо механистичности или немеханистичности индивидуальных воззрений их автора. Это обстоятельство, как видно, осталось совершенно не замеченным и не отмеченным ни М. Л. Ширвиндтом, ни Ю. П. Шеиным.

5. М. Л. Ширвиндт указывает, что среди формулированных мною вопросов нет основного и решающего вопроса, именно вопроса о характере среды — передатчика взаимодействий, каковую среду мы обычно называем эфиром, и попутно отмечает, что я в своем курсе «Физических основ электротехники» фактически придерживаюсь гипотезы «механического эфира». При этом он подчеркивает необходимость принимать гипотезу «немеханического эфира». По этому поводу я должен сказать следующее. Вопрос о свойствах эфира яв-

---

[1] Ленин. Соч., т. XVII, стр. 151.

ляется еще величайшей загадкой, которая стоит перед физиком, и говорить о «механичности» или «немеханичности» эфира пока очень трудно, в особенности если принять во внимание, что само содержание терминов «механический эфир» и «немеханический эфир» весьма спорно, и каждый натурфилософ может до-своему их понимать. Поэтому было бы очень ценно, если бы М. Л. Ширвиндт высказался по этому поводу более или менее определенно и к тому же сформулировал те дополнительные вопросы, которых, по его мнению, не хватает в серии моих десяти вопросов. Лично же я полагаю, что этих десяти вопросов совершенно достаточно для решения поставленной мною проблемы о допустимости «действия на расстоянии» в качестве первичного физического явления. Наконец, позволительно спросить М. Л. Ширвиндта, почему он не допускает, что содержание моих десяти вопросов охватывает в общем и его «немеханический эфир», все же являющийся, насколько я донимаю, основной физической субстанцией, а не чем-то метафизическим.

6. Ю. П. Шеин, разбирая содержание моих десяти вопросов, неоднократно говорит о затронутой в них проблеме пространственной характеристики физических процессов, но при этом совершенно умалчивает о том весьма существенном обстоятельстве, что я в своих вопросах иду дальше и не ограничиваюсь лишь требованием примитивной пространственной характеристики этих процессов и их элементов, а выдвигаю на первый план их объемную характеристику. Если ограничиться лишь требованием пространственной характеристики, то можно представить себе физическое тело как некоторый объем, в котором как-то распределены соответственным образом движущиеся материальные точки. Такого рода заблуждение, как мне неоднократно пришлось убедиться, весьма распространено. Таким образом, не соответствует действительности утверждение Ю. П. Шеина, что «никем ведь и не оспаривается» требуемая мною пространственная характеристика физических процессов, а я ведь требую признания пространственной характеристики в расширенном ее понимании в отношении объемности сколь угодно малых элементов, участвующих в физическом процессе. Хотя Ю. П. Шеин формально и присоединяется к моим «нет» на все 10 вопросов (вполне очевидно, что иначе он никак не может поступить, стремясь придерживаться материалистических воззрений), однако (вышеуказанное недоразумение не позволило ему вникнуть в сущность моих вопросов. Он высказал далее соображение, что признание обязательного значения пространственной характеристики не исчерпывает принципиальных вопросов о физических явлениях, но при этом он совершенно упускает из вида, что я и не стремился к исчерпанию данной общей проблемы, когда формулировал свои 10 вопросов, имеющих очевидною и непосредственною целью выявить роль точки зрения «действия на расстоянии». Вместе с тем Ю. П. Шеин предостерегает против

проводимой мною «геометризации» физических явлений. Из этого можно заключить, что он не признает за объемной характеристикой физических процессов первенствующего значения. По-видимому, он может мыслить о ка-
140
ких-то физических явлениях, которые не укладываются в рамки указанной объемной характеристики, имеющей, с моей точки зрения, принципиальное значение.
7. Можно было бы сказать многое и по поводу других утверждений Ю. П. Шеина, высказанных им в связи с моими десятью вопросами. Но, чтобы не отвлекаться от основного в сторону деталей, я ограничусь еще только одним замечанием, касающимся «regressus in infinitum», о котором он говорит, критикуя основную фарадеевскую идею о физически существующих элементах магнитного потока. Не полагает ли Ю. П. Шеин, что к такому же «regressus in infinitum» мы должны притти и в отношении других квантов, о которыми мы встречаемся в электромагнитных процессах, если только будем последовательно отвергать «действие на расстоянии». Следуя его методу рассуждений, необходимо признать, что для объяснения взаимного отталкивания электронов есть только два пути: либо допустить существование каких-то электронов «второго порядка», «третьего порядка» и т. д. до бесконечности, либо прибегнуть к «синтезу» точки зрения «действия на расстоянии» и точки зрения участия среды. К сказанному добавлю, что в рассуждениях Ю. П. Шеина есть и прямая ошибка. Его физически существующие «радиальные» магнитные линии «второго порядка» будет вызывать сближение магнитных линий «первого порядка», а не взаимное отталкивание и, таким образом, им никак не удастся «выполнять с похвальною успешностью свои функции», которые им приписывает Ю. П. Шеин.

XI

К ВОПРОСУ ОБ УСЛОВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТРАКТОВКИ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ [1]

1. Математика бесспорно является одним из самых мощных орудий, которым мы располагаем при изучении физических явлений. Язык математики позволяет уточнять формулировку количественных соотношений, характеризующих эти явления. Приемы и методы математики помогают нам достигать широких обобщений, с одной стороны, и углубляться в анализ деталей физических явлений, с другой стороны. В связи со всем этим представления и образы, безусловно необходимые и вполне законные в процессе математических операций, мало-помалу проникают в наше физическое мышление и оказывают сильное влияние на образование тех представлений, которыми мы пользуемся при описании физических явлений. Однако не все подобные представления, будучи весьма полезными при математическом анализе, могут быть признаны в то же время строго соответствующими реальному содержанию физических явлений. Дело в том, что некоторые представления явились результатом простого объективирования математических абстракций без должного физического анализа данных абстракций. В известных случаях этот анализ и не мог быть своевременно осуществлен, в виду того, что трактуемые физические явления еще не были достаточно изучены экспериментально. Но по мере накопления опытного материала в свете современных физических открытий необходимо периодически подвергать пересмотру наши физические представления, нередко являющиеся лишь отражением математической символики. В других случаях ошибочность некоторых физических представлений, возникших на почве объективирования математических абстракций, могла бы быть выяснена по существу еще давно. Во всяком случае, это должно быть, наконец, сделано теперь путем чисто логического рассмотрения простейших примеров, относящихся к той или иной группе физических явлений.
2. В статье С. Н. Шипкова, напечатанной в № 12 журн. «Электричество» за 1933 г. под заглавием «Условность строго математиче-

[1] «Электричество», 1933, № 12, стр. 1,
142

ской интерпретации мгновенного значения силы электрического тока», содержатся весьма ценные соображения по вопросу о необходимости различать математическое определение силы электрического тока и реальное содержание этого электромагнитного явления. Он совершенно справедливо указывает, что структура обычного математического определения силы тока $i = \frac{dq}{dt}$ внушает идею о возможности непрерывного изменения силы тока, между тем как современная физика заставляет признать возможность только скачкообразных изменений силы тока в связи с квантованием электричества.

Я считаю полезным добавить несколько слов к соображениям. С. Н. Шипкова, касающимся квантования силы электрического тока, и сверх того привести из области электрических и магнитных явлений другие примеры условности и даже физической несостоятельности Некоторых наших представлений, являющихся следствием недостаточно закономерного использования математических абстракций за пределами их действительной применимости.

3. Необходимо прежде всего, по моему мнению, отметить то обстоятельство, что квантование тока должно быть внутренне связано не только с квантованием электричества, т.-е. существованием элементарных неделимых зарядов, но также и с вероятным квантованием скорости электронов. Как известно, современная квантовая механика в своем развитии приходит к представлению о квантовании пространства-времени. Эта идея на первый взгляд кажется совершенно парадоксальной, но то зерно истины, которое в ней содержится, состоит, по-видимому, именно в том, что скорости электронов не могут претерпевать непрерывного, изменения, а как-то квантуются. Таким образом в выражении для силы тока, вытекающем из электронной теории:

$$i = nevs,$$

при неизменном заряде электрона, e и некотором неизменном сечении провода s, по всей вероятности квантуются величины n и v т.-е. число электронов в единице объема и средняя скорость электронов. Если бы скорость v могла претерпевать какие угодно изменения, то были бы мыслимы непрерывные изменения силы тока, несмотря на квантование количества n.

4. Из того, что количество электричества q не может претерпевать непрерывных изменений, а квантуется в связи с существованием элементарного заряда e, вытекает необходимость признать и квантование э. д. с. E, которую мы обычно выражаем математически в формах, не учитывающих этого важного обстоятельства. Для пояснения сказанного представим себе некоторую проводящую цепь, в которой действует постоянная э. д. с. E и которая замкнута на конденсатор с неизменной емкостью C. В таком случае мы можем написать

$$E = \frac{q}{C}.$$

Так как количество электричества q квантуется, то, следовательно, квантуется и. э. д. с. E. Признав таким образом, что свойство квантования присуще э. д. с. E, и принимая сопротивление некоторой проводящей цепи r неизменным, рассмотрим теперь случай постоянного тока, в подобной цепи, замкнутой накоротко. Из соотношения

$$E = ri$$

вытекает, что даже при отсутствии каких-либо иных указаний на квантование тока мы должны были бы это признать, исходя из квантования э. д. с. И обратно, признав квантование тока, мы должны на основании последнего соотношения утверждать, что и э. д. с. всегда вообще квантуется, т.-е. изменяется не непрерывно, а некоторыми скачками, которых мы практически не замечаем только вследствие их чрезвычайной малости.

5. Квантование э. д. с. несомненно, должно обусловливаться физическими причинами, ее порождающими. В случаях, например, э. д. с. контактного характера основную роль играет количество электронов, прошедших через некоторую поверхность раздела двух проводящих сред. А это количество электронов, конечно, может быть только целым числом. В случае индуктированной э. д. с. объяснения, очевидно, надо искать в признании квантования магнитного потока. Что это должно быть именно так, следует, между прочим, из рассмотрения потока самоиндукции Φ_s, сцепляющегося

с неизменяемой цепью некоторого тока *i*. Коэффициент самоиндукции *L* при неизменности цепи есть величина постоянная. Исходя из соотношения

$$\Phi_s = Li,$$

необходимо заключить, что магнитный поток квантуется, так как сила тока *i* квантуется. Следовательно, реальный физический процесс, происходящий в магнитном поле, мы должны признать состоящим из отдельных дискретных элементов. Таким образом, мы имеем полное подтверждение справедливости (основной идеи Фарадея о «физических силовых линиях» магнитного поля. Пользуясь современным языком, мы можем говорить о физически существующих элементарных трубках магнитной индукции. *B* абсолютной электромагнитной системе мы обычно пользуемся представлением об единичной трубке магнитной индукции и для обозначения ее применяем более краткий и практически более удобный термин «магнитная линия», имея в виду ось единичной трубки. При этом в понятие о магнитной линии мы должны вкладывать реальное содержание, в точности соответствующее фарадеевской идее о «физической силовой линии» магнитного поля. Итак, магнитный поток *Ф,* математически обычно рассматриваемый условно как величина, могущая претерпевать непрерывные изменения, в действительности может изменяться только скачкообразно, так как реально существуют дискретные элементы магнитного потока. 6. В вышерассмотренных примерах условность математических соотношений надо понимать в том смысле, что они по существу выражают собою лишь закономерности статистического характера

и, совершенно правильно учитывая общий ход изменений среднего значения некоторой физической величины, не могут претендовать на то, чтобы исчерпывающим образом описывать все отдельные стадии этих изменений. Но есть случаи, когда условность математического соотношения носит более существенный характер и когда на почве слишком примитивной трактовки этого соотношения возникают ошибочные принципиальные установки. Наиболее яркий пример этого рода мы имеем в виде «физического действия на расстоянии», т.-е. действия на расстоянии, рассматриваемого в качестве какого-то первичного физического явления. Происхождение этой псевдофизической идеи коренным образом связано с объектированием понятий, вытекающих из математической формулировки ньютоновского закона всемирного тяготения и кулоиовских законов взаимодействия электрических зарядов и магнитных масс. Несмотря на ясно выраженное мнение Ньютона, что представление о действии на расстоянии не имеет никакого физического смысла, являясь лишь базой математической трактовки явлений тяготения, и что оно, рассматриваемое в качестве первичного физического явления, представляет собою полный абсурд, несмотря на совершенно определенные указания Кулона, что формулированные им законы имеют только чисто описательный характер, ничего не говоря о природе явления, — несмотря на все это, мало-помалу с течением времени идея физического действия на расстоянии начала все больше и больше внедряться в научное мышление и в настоящее время доминирует в физике.

А между тем достаточно самого элементарного рассмотрения простейших случаев для того, чтобы убедиться в абсурдности идеи о физическом действии на расстоянии. Рассмотрим, например, взаимодействие двух электрических зарядов q_1 и q_2 или взаимодействие двух магнитов N_1S_1 и N_2S_2. Предположим далее, что заряд q_1 или магнит N_1S_1 окружен со всех сторон двумя замкнутыми поверхностями S_1 и S_2, нигде не касающимися и не пересекающимися.

Зададим теперь вопрос: могут ли электрические заряды q_1 и q_2 или магниты N_1S_1 и N_2S_2 взаимодействовать так, чтобы при этом в слое между замкнутыми поверхностями S_1 и S_2 не происходило какого бы то ни было физического процесса?

С точки зрения действия на расстоянии на этот вопрос необходимо ответить категорическим «да».

С точки зрения Фарадея и Максвелла единственно возможным ответом является самое решительное «нет».

Казалось бы, ответ «да» включает в себе признание участия каких-то, так сказать, спиритических факторов в физических процессах. Ответ же «нет» естественно приводит нас к признанию участия среды, окружающей взаимодействующие физические центры. И тем не менее, в последнее время в

науке чрезвычайно распространено допущение физического действия на расстоянии и полное отрицание участия среды. С целью математического описания явлений распространения электромагнитных возмущений в представление о действии на расстоянии, сильно поколебленное в своих позициях

145

открытиями Герца, была внесена поправка, а именно было введено в науку понятие о запаздывающем действии на расстоянии. Но это последнее является еще большим физическим абсурдом, чем простое действие на расстоянии, и при рассмотрении сущности явлений приводит к явному нарушению закона сохранения энергии и закона причинности. [1]

Итак, условность идеи о действии на расстоянии (простом или запаздывающем) заключается в том, что использование этой идеи вполне целесообразно и совершенно законно лишь в области математического описания и анализа физических явлений, но при трактовке вопроса о вероятной природе реальных физических процессов мысль о действии на расстоянии явно абсурдна и потому недопустима.

Приходится, к сожалению, отметить, что защитники физического действия на расстоянии, как показал опыт, всемерно уклоняются в большинстве случаев от прямого и четкого ответа на вопрос, подобный сформулированному мною. Выражаясь словами проф. П. С. Эренфеста, можно сказать, что защитники физического действия на расстоянии «боятся философствовать». [2] Вместо обсуждения принципиальной стороны дела они обычно отвлекаются в сторону рассмотрения различных второстепенных подробностей, и это приводит только к замаскированию сущности вопроса. Например, делаются попытки опровергнуть принципиальную необходимость участия среды во всех физических взаимодействиях сведе'нием фарадее-максвелловской точки зрения к наивным представлениям о «физических силовых линиях» как о грубо материальных нитях из какого-то неведомого вещества. При этом противники фарадее-максвелловской точки зрения игнорируют то обстоятельство, что в настоящее время даже элементы обычной материи — электроны, протоны — мыслятся в виде некоторых пакетов волн, которые должны быть понимаемы, конечно, как результат соответствующих волновых процессов, происходящих на фоне какой-то физической, а не воображаемой среды, т.-е. на фоне какой-то физической первоматерии, заполняющей все наше трехмерное пространство. Ясно, что и «физические силовые линии» надо понимать как оси, характеризующие специфический процесс на фоне той же основной среды. Быть может, это — процесс волновой же природы, а быть может, это — процесс вихревого характера. Не в этом суть принципиального вопроса, сформулированного мною.

7. Из всего изложенного выше отнюдь не следует выводить неправильное заключение, будто бы я хочу сказать, что приемы математического анализа физических явлений опасны, ошибочны и т. п. Совсем наоборот, язык математического анализа совершенно необходим при описании и исследовании физических явлений,

---

[1] В. Ф. Миткевич. Основные воззрения современной физики. Речь, читанная на торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г. (См. настоящий сборник, статья II.)

[2] См. 2-ю беседу о природе электрического тока, «Электричество», 1930, № 8, стр. 349.

146

и применение его приводит к весьма ценным результатам. Надо только помнить, что математические формулировки, дающие нам, вообще говоря, точное описание общего хода явления и касающиеся нередко только внешнего эффекта, обнаруживающегося в физическом явлении, иногда ничего не говорят о внутреннем содержании этого явления, о его природе. Следует во всяком случае иметь в виду, что язык и формы математического анализа не составляют сущности физической теории, а играют при ее построении и описании лишь вспомогательную, хотя и весьма важную роль. Физическая же теория представляет собою строго обоснованную и не содержащую внутренних противоречий систему взаимно согласованных физических представлений.

XII

ПО ПОВОДУ СТАТЬИ ПРОФ. Д. Б. ГОГОБЕРИДЗЕ «К ВОПРОСУ ОБ УСЛОВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТРАКТОВКИ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ» [1]

1. В № 1 журнала «Электричество» за текущий год помещена статья проф. Д. Б. Гогоберидзе под вышеуказанным заглавием, [2] представляющая собой попытку критики некоторых моих взглядов по вопросу о природе электромагнитных явлений. Я с большим удовлетворением прочел эту статью, так как она весьма убедительно доказывает, что довольно трудно подыскать хорошо аргументированные возражения против точки зрения, которая представляется мне единственно правильной в области основных физических представлений. Со многими соображениями и суждениями проф. Д. Б. Гогоберидзе я, конечно, не могу никак согласиться. Остановлюсь на главнейшем.

2. Проф. Д. Б. Гогоберидзе совершенно правильно понял мое определение того, чем должна быть

34

физическая теория. Но он ошибается, требуя от современных систем физических представлений полной законченности и полного приближения к идеалу, к которому мы должны стремиться по мере развития наших физических знаний. До настоящего времени общей физической теории еще не существует в законченном виде. На это я совершенно определенно указываю в заключительной части своей речи «Основные воззрения современной физики».[3] В виду сказанного в каждом частном случае речь может идти только о степени приближения некоторой системы физических Представлений к стоящему перед нами пока еще отдаленному идеалу, и с этой точки зрения данное мной определение необходимо рассматривать как критерий при сравнительной оценке различных современных теоретических построений.

3. Проф. Д. Б. Гогоберидзе не прав, говоря о моей теории электромагнитного поля. О подобной теории я ничего не слыхал.

---

[1] «Электричество», 1934, № 7, стр. 40.

[2] Упомянутая статья проф. Д. Б. Гогоберидзе написана им в ответ на мою статью под тем же заглавием, (См. настоящий сборник, статья XI.)

[3] Речь, читанная в торжественном годовом собрании АН СССР 2 февраля 1933 г. См. сборник «Карлу Марксу Академия Наук СССР» и введение к 3-му изд. курса «Физические основы электротехники», 1933, (См. также настоящий сборник, статья II.)

148

Мне можно приписать только упорную защиту системы основных физических представлений, разработанной Фарадеем и развитой далее Максвеллом, а также указание на некоторые логически вытекающие отсюда следствия. Что касается моих разногласий с Дж. Дж. Томсоном по вопросу о том, что же является основной реальностью — магнитные линии или трубки электрического смещения, то необходимо отметить следующие мотивы моей позиции. В последних сериях своих исследований (III том Experimental Researches in Electricity) Фарадей дает обстоятельный анализ всего, известного ему из области электромагнитных явлений, и неоднократно подчеркивает особо важную роль той стороны этих явлений, которую мы воспринимаем в качестве элементов магнитного поля, Таким образом в своем стремлении опираться на представление о магнитных линиях, как на исходное, я лишь делаю попытку возможно ближе подойти к общему ходу идей Фарадея.

4. Искусство чтения чужих мыслей, несомненно, представляет большой интерес, но едва ли оно может найти целесообразное применение в научной дискуссии о природе физических явлений. Дело в том, что при этом можно впасть в ошибку, как это и случилось с проф. Д. Б. Гогоберидзе. Он приписал мне целый ряд представлений о мировом эфире, которых никогда не было в моих мыслях. Основываясь только на предположениях, он пишет: «...однако можно думать, что согласно фарадеевой идее он (Миткевич) рассматривает мировой эфир как одну из разновидностей обычной материи, имеющую очень малую массу, но чрезвычайно большую упругость...». И дальше проф. Д. Б. Гогоберидзе, конечно, без труда разбивает эти устарелые представления, которые, кстати сказать, ни в коем случае не должны быть ассоциируемы) с именем Фарадея. Как известно, Фарадей с очень

большой осторожностью и при том, в немногих лишь случаях прибегал к идее о мировом эфире и никаких соображений касательно его основных свойств сам не высказывал. Совершенно несомненно, что в связи с общей эволюцией наших физических представлений вопрос об эфире должен получить новое освещение, и многое из того, что говорилось раньше об этой субстанции, необходимо отбросить. В вышецитированной своей речи — «Основные воззрения современной физики»—я указываю, что в настоящее время мы не располагаем достаточными материалами для построения физической теории эфира. В этом отношении придется еще много поработать. Но все же говорить о мировом эфире необходимо. Без этого основного представления не может развиваться физическая мысль, стремящаяся связать разрозненные факты в стройное целое.

5. Совершенно непонятно, где в моих работах проф. Д. Б. Гогоберидзе усмотрел утверждение, «что фазовые волны имеют место в нашем трехмерном пространстве на фоне физической первоматерии». Приписывая мне подобное утверждение, он во второй раз делает ошибку на почве неудачной попытки чтения моих мыслей. Всем хорошо, конечно, известно, что многомерное конфигурационное пространство никак нельзя отождествлять с физическим трехмерным

149

пространством. Но также хорошо известно и то, что в простейшем случае отдельного, например, электрона этот последний может рассматриваться как пакет максвелловских волн в нашем трехмерном пространстве, т.-е. в этом простейшем случае представления квантовой теории волн приобретают весьма простой физический смысл. Таким образом мы приходим к некоторой конкретной схеме строения отдельного электрона или протона, вполне подтверждаемой известными опытами с дифракцией материальных лучей. Не может быть, однако, чтобы природа этих физических реальностей претерпевала принципиальное изменение в случаях более сложных, когда мы имеем дело с совокупностями электронов и протонов. Правда, математический аппарат квантовой теории волн пока еще оперирует в этих случаях с фазовыми волнами в многомерных, абстрактно-математических пространствах и мы еще не умеем осмыслить физическое значение этих операций. Но из этого, повторяю, не следует, Чтобы представление о физической природе данных объективных реальностей должно было коренным образом изменяться только Потому, что эти реальности входят в состав некоторой их совокупности. Наоборот, надо надеяться, что дальнейшее развитие квантовой теории волн, этой весьма молодой отрасли теоретической физики, даст еще не мало материала для физического понимания ее выводов. Обо всем этом я также говорю вполне ясно и определенно в п. 12 своей речи «Основные воззрения современной физики». Итак, возражения проф. Д. Б. Гогоберидзе по данному поводу необходимо признать не имеющими какого-либо серьезного значения.

6. Упрекая меня в грубо-механистических концепциях в отношении электромагнитного поля, проф. Д. Б. Гогоберидзе, к сожалению, не дает четких указаний, в каких именно моих утверждениях выявляется по его мнению, грубый механицизм. В виду этого есть полное основание считать его упрек совершенно бездоказательным. С гораздо большим правом можно усмотреть в суждениях проф. Д. Б. Гогоберидзе элементы тонко-идеалистических тенденций. Дело в том, что он решительно возражает против попыток представить себе те механические движения, которые обязательно должны иметь место в эфира в связи с электромагнитным полем. Он, между прочим, говорит: «Не стоит перечислять всех неудачных и противоречивых попыток дать, исходя из механических моделей эфира, картину явлений, происходящих в электромагнитном поле...» Проф. Д; Б. Гогоберидзе возражает не против неправильного использования механических моделей эфира при рассмотрении процессов, происходящих в электромагнитном поле, а против самого оперирования с подобными моделями. Таким образом он игнорирует то обстоятельство, что всякое движение (в общефилософском смысле слова), всякий физический процесс, обязательно включает в себе некоторое механическое движение, которое хотя и не исчерпывает собой природы Соответствующего процесса, но совершенно неотделимо от него.

Сущность механистической точки зрения в области физических представлений состоит не в признании обязательного наличия

150

механического движения, т.-е. пространственного перемещения во всяком движении вообще, во всяком физическом процессе, а в ошибочном предположении, что новые качественные характеристики, которыми всегда обладает любая сложная комбинация каких-либо элементарных движений, могут быть разложены на простейшие свойства этих элементарных движений, и, в частности, в попытках сведе'ния специфических особенностей всякого физического процесса к свойствам чисто механических движений. Признание эфира, в котором могут иметь место механические движения, само по себе еще не является свидетельством о механистической точке зрения, подобно тому, как и оперирование, например, с «идеальной» жидкостью Гельмгольца вовсе не должно быть рассматриваемо в качестве признака идеалистической установки. Нельзя рассуждать с точки зрения филологических признаков. Суть дела не в словах, а в содержании слов.

Само собой разумеется, что, если механическое движение содержится как совершенно неотъемлемая часть во всяком движении вообще, во всяком физическом процессе, то стремление познать это механическое движение вполне правильно и целесообразно. Желательно по мере возможности составить себе, наконец, вероятную картину механических движений, присущих каждому физическому процессу; но надо только помнить, что этим ни в коем случае еще не исчерпывается задача изучения и понимания данного процесса. Таким образом попытки классической физики дать некоторую общую схему механических движений, происходящих в электромагнитном поле, не являются сами по себе чем-то, заслуживающим безусловного осуждения. В исторической перспективе их надо рассматривать в качестве совершенно законных, хотя до сих пор и не удачных попыток сделать то, что, в конце концов, должно быть сделано. Все эти пока безрезультатные попытки представляют собой, однако, весьма ценный материал для будущих исследователей.

Итак, представление о каком-либо физическом процессе вообще или об электромагнитном процессе в частности вне обязательной связи их с какими-то элементарными механическими движениями — принципиально ошибочно, совершенно подобно тому, как будет принципиально ошибочно представление о материи самой по себе. Все это представляет собой явный признак физического идеализма, который, несомненно, является коренной причиной многих патологических уклонов в современной физической мысли. Указанная ошибочная точка зрения в отношении электромагнитного поля чрезвычайно распространена в настоящее время. С этим связаны обычно и все возражения против представления о мировом эфире как о физической субстанции, объемные элементы которой могут претерпевать какие-либо пространственные перемещения, т.-е. находиться в состоянии механического движения.[1]

---

[1] См. например И. Е. Тамм. «Под Знаменем марксизма», № 2, 1933, стр. 225—227; Э. Кольман. «Под знаменем марксизма», № 4, 1933, стр. 230; М. Л, Ширвиндт. Сборник Ленинградского электромеханического института (ЛЭМИ), № 2, 1933, стр. 9; Ю. П. Шеин, ЛЭМИ, № 2, 1933, стр. 11.

151

Как известно, идею о «немеханическом» эфире, т.-е. о таком «Эфире», к которому нельзя применять понятие механического движения, высказал еще Эйнштейн. Но подобный «эфир» является чем-то физически бессодержательным, и термин этот в эйнштейновском смысле представляет собой в действительности не что иное, как лишь своеобразный синоним термина «абсолютная пустота». Сторонники «немеханического» эфира, таким образом, отрываются от физической действительности, возражая против «механистических моделей» эфира, против «механического» или «полумехаиического» эфира.

7. В заключение я скажу несколько слов по поводу основной темы статьи проф. Д. Б. Гогоберидзе — условности математической трактовки физических явлений,—лишь мимоходом затронутой и по существу им совершенно не освещенной. Возражая мне в связи с опубликованием мной статьи на ту же тему, [1] он коснулся только вопроса о квантовании тока, между тем как я связываю это с общим вопросом о квантовании в области электромагнитных явлений и указываю, между прочим, что даже при отсутствии каких-либо иных указаний на квантование тока мы должны были бы это признать, исходя из квантования э. д. с. Таким образом спорный и пока еще весьма темный вопрос о

квантовании пространства не имеет в данном отношении решающего значения. Ведь я в своей статье совершенно определенно говорю, что суть дела не в квантовании пространства, а в том, что в этой парадоксальной идее, по-видимому, содержится зерно истины, состоящее в признании квантования скоростей электронов. Почему проф. Д. Б. Гогоберидзе не привел подлинных строк из моей статьи, а остановился на некоторых лишь словах без необходимого контекста, — это мне непонятно.

В конце концов, не ясно, признает ли проф. Д. Б. Гогоберидзе правильной и своевременной постановку общего вопроса о квантовании в области электромагнитных процессов или же он принципиально возражает против этого.

Наконец, нельзя не выразить сожаления, что проф. Д. Б. Гогоберидзе совершенно умолчал о приведенном мной наиболее ярком примере условности математической трактовки физических явлений. Я имею в виду вопрос о «физическом» действии на расстоянии. Ведя борьбу против господства этой псевдо-физической идеи, я сформулировал следующий вопрос: [2]

Могут ли две какие-либо физические системы, находящиеся на некотором расстоянии одна от другой, взаимодействовать так, чтобы при этом в слое, со всех сторон окружающем одну из этих систем не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Вопрос этот имеет весьма существенное значение при рассмотрении природы физических явлений. Я отвечаю на него самым категорическим «нет». Опыт ряда лет показывает, что возражающие

---

[1] «Электричество», 1933, № 12, стр. 1. (См. настоящий сборник, статья XI.)

[2] См. «Электричество», 1933, № 12, стр. 3 и 1934, № 1, стр. 15-19. См. также «Социалистическая реконструкция и наука», 1933, № 4, стр. 47—49.

против защищаемых мной общих физических представлений обычно почему-то обходят этот вопрос. Все возражения, которые выдвигает против меня проф. Д. Б. Гогоберидзе, несомненно, приобретут большую определенность и четкость, если он не откажется продолжать начатую им дискуссию со мной и при этом ясно укажет, считает ли он необходимым ответить на поставленный Мной вопрос так же, как и я, т.-е. «нет», или же он присоединяется к проф. Я. Н. Шпильрейну и проф. Я. И. Френкелю, которые защищают точку зрения «физического» действия на расстоянии и потому вынуждены ответить на мой вопрос «да».

XIII

ПО ПОВОДУ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗЗРЕНИЙ ПРОФ. Д. Б. ГОГОБЕРИДЗЕ [1]

В № 5 журнала «Электричество» за 1935 г, проф. Д. Б. Гогоберидзе в статье «К вопросу об условности математической трактовки физических явлений» вновь выступил с возражениями против моих физических воззрений. В виду того, что он продолжает, к сожалению, игнорировать многое, сказанное мною по затрагиваемым им вопросам, и продолжает приписывать мне мысли, авторство которых я никак не могу принять на свой счет, [2] мне представляется наиболее целесообразным в целях сосредоточения внимания на самом существенном сформулировать свой ответ проф. Д. Б. Гогоберидзе и свою точку зрения в виде ряда вопросов, на которые я отвечаю «нет». Вопросы построены так, что на них, по моему мнению, можно ответить только «да» или «нет» при исключенном третьем. Вопросы эти таковы:

Вопрос 1. Можно ли утверждать, что существует такой физический процесс, иными словами, такое движение в общефилософском смысле слова (применительно к области физических явлений), в состав которого не включается какое бы то ни было механическое движение, понимаемое как пространственное перемещение некоторой физической реальности,[3] соответствующей рассматриваемому процессу, или ее частей?

Вопрос 2. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо физический процесс (например, электромагнитное поле или тепловой процесс и т. п.) обладает как целое

---

[1] «Электричество», 1935, № 22, стр. 42.

[2] Так, например, в своей последней статье («Электричество», 1935, № 5, стр. 49, второй столбец, строки 19 и 20 сверху) проф. Д.. Б. Гогоберидзе приписывает мне фразу: «фазовые волны имеют место в нашем трехмерном пространстве на фоне физической первоматерии». Я утверждаю, что эта фраза составлена самим проф. Д. Б. Гогоберидзе из отдельных слов, которые он встретил в моих статьях, и что я не являюсь автором этой фразы. Совершенно напрасно он изощряется в искусстве чтения чужих мыслей вместо того, чтобы оперировать только с действительным содержанием моих высказываний.

[3] Физической реальностью называется объективная реальность, которая участвует в некотором физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении.

только такими качественными характеристиками, которые могут быть сведены к простой сумме некоторых свойств, принадлежащих элементарным механическим движениям, имманентно связанным с данным физическим процессом, т.-е. обязательно заключающимся в нем?

Вопрос 3, Правдоподобно ли утверждение, что в некотором физическом процессе как таковом могут иметь место какие бы то ни было изменения количественного или качественного характера при полном отсутствии соответствующих изменений в элементарных механических движениях, имманентно связанных с данным физическим процессом?

Вопрос 4. Правдоподобно ли предположение, что электромагнитное поле может существовать само по себе, без всякого участия какого бы то ни было материального носителя?

Вопрос 5. Можно ли утверждать, что электромагнитные колебания могут происходить при полном отсутствии соответствующих, имманентно с ними связанных, механических движений (в смысле, указанном в вопросе 1)?

Вопрос 6. Можно ли утверждать, что природа электрона не имеет Электромагнитного характера?

Вопрос 7. Можно ли утверждать, что причины, обусловливающие дифракцию электронов, не имеют ничего общего с какими-либо волновыми процессами электромагнитного характера, происходящими в реальном трехмерном пространстве?

Как указано выше, на все эти семь вопросов я отвечаю «нет», В высокой степени ценно знать, как отвечает на эти вопросы проф. Д. Б. Гогоберидзе. Только при получении от него четких, ясных ответов наш спор может приобрести характер правильно организованной научной дискуссии. Вместе с тем в этом случае более или менее определенно выяснится, прав ли проф. Д. Б. Гогоберидзе, упрекающий меня в грубо-механистических воззрениях, или прав я, усматривающий в его рассуждениях тонко-идеалистические тенденции.

XIV

К ОКОНЧАНИЮ ДИСКУССИИ С ПРОФ. Д. Б. ГОГОБЕРИДЗЕ ОБ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗЗРЕНИЯХ [1]

1. В № 22 журнала «Электричество» за 1935 г. помещены: моя заметка «По поводу физических воззрений проф. Д. Б. Гогоберидзе» [2] и его ответ на эту заметку. Учитывая, что наш обмен мнений не привел до сих пор к достаточно отчетливой формулировке сущности нашего научного спора и наших принципиальных позиций, но в значительной степени сводился к пространным общим рассуждениям, я счел целесообразным, с целью направления этого спора в русло совершенно ясных высказываний с той и с другой стороны, предложить вниманию проф. Д. Б. Гогоберидзе семь специально сформулированных мной вопросов, Я полагал, что простые четкие ответы «да» или «нет» на эти семь вопросов очень помогут нам в дальнейшем так или иначе убедить друг друга и договориться. Со своей стороны я на все эти семь вопросов отвечаю «нет».

Проф. Д. Б. Гогоберидзе уклоняется от того, чтобы дать определенные ответы на мои семь вопросов, и заявляет, что при таком направлении дискуссии он больше не желает в ней участвовать. Итак, наш длившийся довольно долго научный спор заканчивается по причине отказа одной из спорящих

сторон (проф. Д. Б. Гогоберидзе) от продолжения его. Постараюсь по возможности в немногих словах охарактеризовать сущность заключительного ответа моего оппонента так, как я это понимаю.

2. Проф. Д. Б. Гогоберидзе во всех своих предыдущих выступлениях и в своем заключительном ответе упрекает меня в механистическом характере моих физических воззрений. В это же время он сам декларирует свою собственную позицию в качестве позиции диалектического материализма. В последнем своем ответе он определенно говорит: «...стоя на точке зрения диалектического материализма и пользуясь его системой воззрений, я показываю неправильность взглядов и системы воззрений акад. Миткевича». Именно поэтому, с целью вскрыть полную ошибочность подобных утверждений проф. Д. Б. Гогоберидзе, я и предложил ему свои первые три вопроса.

---

[1] «Электричество», 1936, № 6, стр. 28.

[2] См. настоящий сборник, статья XIII.

156

Вопрос 1. Можно ли утверждать, что существует такой физический процесс, иными словами, такое движение в общефилософском смысле слова (применительно к области физических явлений), в состав которого не включается какое бы то ни было механической движение, понимаемое как пространственное перемещение некоторой физической реальности.[1] соответствующей рассматриваемому процессу, или ее частей?

Вопрос 2. Соответствует ли вероятной природе вещей утверждение, что какой-либо физический процесс (например, электромагнитное поле или тепловой процесс и т. п.) обладает как целое только такими качественными характеристиками, которые могут быть сведены к простой сумме некоторых свойств, принадлежащих элементарным механическим движениям, имманентно связанным с данным физическим процессом, т.-е. обязательно заключающимся в нем?

Вопрос 3. Правдоподобно ли утверждение, что в некотором физическом процессе как таковом могут иметь место какие бы то ни было изменения количественного или качественного характера при полном отсутствии соответствующих изменений в элементарных механических движениях, имманентно связанных с данным физическим процессом? Вместо того, чтобы просто ответить мне на эти вопросы, как того требует декларируемая им точка зрения диалектического материализма, т.-е. «нет», проф. Д. Б. Гогоберидзе делает попытку представить дело так, как будто бы вышеприведенные вопросы не заслуживают особого внимания в виду того, что в (них нет никакого содержания сверх подтверждения того или иного тезиса диалектического материализма. А между тем, если бы он открыто признал для себя обязательным присоединиться к моим ответам «нет», то он понял бы, что тем самым опрокидываются все его попытки обвинить меня в механистических тенденциях. Он понял бы, что говорить о механических движениях, внутренне связанных с процессами, протекающими в магнитном поле, не только допустимо, но прямо необходимо, если мы хотим углубиться в вопрос о природе магнитного потока. Он понял бы, наконец, истинный смысл следующих слов Энгельса:

«Всякое движение связано с каким-нибудь перемещением — перемещением небесных тел, земных масс, молекул, атомов или частиц эфира. Чем выше форма движения, тем мельче это перемещение. Оно нисколько не исчерпывает природы соответствующего движения, но оно неотделимо от него. Поэтому его приходится исследовать раньше всего остального». [2]

Таким образом, только сторонники физического идеализма могут усматривать проявление механистической точки зрения в попытках представить себе, какие именно пространственные перемещения орга-

---

[1] Физической реальностью называется объективная реальность, которая участвует в некотором физическом явлении в качестве носителя свойств, обнаруживаемых в этом явлении.

[2] Фридрих Энгельс. «Диалектика природы», 6-е издание, 1932 стр. 130.

157

нически связаны с природой магнитного потока. Нет ничего предосудительного в том, чтобы присоединиться, например, к мнению Максвелла о том, что элементарные составляющие магнитного потока представляют собой не что иное, как вихревые нити, имеющие место в какой-то первичной среде (в эфире), на фоне которой происходят электромагнитные процессы. А ведь проф. Д. Б. Гогоберидзе решительно протестует против подобного направления физической мысли (и в этом именно усматривает центр тяжести моих, якобы механистических уклонов.

Перехожу к следующим моим вопросам.

Вопрос 4. Правдоподобно ли предположение, что электромагнитное поле может существовать само по себе, без всякого участия какого бы то ни было материального носителя?

Проф. Д. Б. Гогоберидзе ограничивается указанием, что на эту тему он уже говорил в своей прошлой статье и потому он не считает нужным категорически ответить «да» или «нет».

Однако из его предыдущей статьи далеко не ясно, как именно ОН мог бы ответить на четвертый вопрос. А между тем его четкий ответ «нет» заставил бы его признать, что многие обвинения, выдвигаемые им против меня, сами собой рушатся.

Вопрос 5. Можно ли утверждать, что электромагнитные колебания могут происходить при полном отсутствии соответствующих, имманентно с ними связанных механических движений (в смысле, указанном в первом вопросе)?

Вопрос 6. Можно ли утверждать, что природа электрона не имеет электромагнитного характера?

Вопрос 7. Можно ли утверждать, что причины, обусловливающие дифракцию электронов, не имеют ничего общего с какими-либо волновыми процессами электромагнитного характера, происходящими в реальном трехмерном пространстве?

Казалось бы, строго определенные ответы на мои первые четыре вопроса в значительной степени предрешают ответы и на последние три вопроса, в особенности на вопросы пятый и седьмой, Проф. Д. Б. Гогоберидзе не обратил внимания на тесную внутреннюю связь между предложенными ему семью вопросами, которые идут один за другим в строго логическом порядке. Вместо простых четких ответов он уклоняется в сторону пространных рассуждений, из которых трудно понять, как же именно он отвечает на мои последние три вопроса. Между прочим, по поводу вопроса пятого он недоумевает, о каких именно движениях идет речь. Очевидно, проф. Д. Б. Гогоберидзе не обратил внимания на то, что в игнорируемом им вопросе первом во избежание недоразумений я совершенно четко определил, что именно я разумею под термином «механическое движение»,

По поводу моего шестого вопроса проф. Д. Б. Гогоберидзе опять-таки недоумевает, что значат слова «электромагнитный характер», и никакого определенного ответа не дает.

Особенно детально проф. Д. Б. Гогоберидзе остановился на моем седьмом вопросе и все же никакого четкого ответа не дал. Он, ко-

158

вечно, прекрасно понимает, что речь идет не о математической символике, которой мы так часто пользуемся при описании физических явлений, а о реальном содержании, о природе этих явлений. И вот, возражал мне, он говорит: «Можно утверждать, что фазовые волны, обусловливающие дифракцию электронов, распространяются в многомерном пространстве, имеют скорость, большую скорости света, и не несут с собою энергии и этим резко отличаются от электромагнитных колебаний». Таким образом, приходится заключить, что проф. Д. Б. Гогоберидзе придает многомерным пространствам, фигурирующим в абстрактно-математических операциях квантовой волновой механики, характер чего-то, имеющего непосредственное отношение к. реальному миру физических явлений. Отсюда один шаг до признания реального существования этих многомерных пространств, число измерений которых может быть сколь угодно велико. Насколько это соответствует позициям диалектического материализма, о приверженности к которым проф. Д. Б. Гогоберидзе так определенно говорит, предоставляю судить компетентным читателям и самому автору вышеприведенного утверждения.

3. Как показал мне длительный опыт дискутирования вопросов, относящихся к природе физических явлений, предлагаемые мною моим оппонентам вопросы обладают, по крайней мере, одним заме-

чательным свойством. Именно: в огромном большинстве случаев мои оппоненты не решаются дать на них простой ответ, противоположный моему ответу, но либо под тем или иным предлогом игнорируют мои вопросы, либо пытаются уклониться от ответа по причине якобы неправильной постановки того или иного вопроса, но при этом не говорят, как же по их мнению нужно правильно сформулировать вопрос; либо же, наконец, вместо ответа развивают пространные рассуждения по поводу содержания вопроса и этим ограничиваются.

4. В заключение моей дискуссии с проф. Д. Б. Гогоберидзе я коснусь вопроса о спорной фразе, авторство которой он мне ошибочно приписал. Именно; в № 5 журнала «Электричество» за 1935 г. (стр. 49, второй столбец, строки 19 и 20 сверху) он ОТ моего имени цитирует буквально следующую фразу: «фазовые волны имеют место в нашем трехмерном пространстве на фоне физической первоматерии».

В свое время я указал, что действительным автором этой фразы является сам проф. Д. Б. Гогоберидзе, а ни в коем случае не я, которому никогда и в голову не приходило подобное удивительное утверждение. В последнем своем ответе проф. Д. Б. Гогоберидзе пытается все же доказать правильность приведенной им цитаты из моей статьи. Он признает, однако, что мою подлинную фразу он сократил, но при этом умалчивает о том, что он ввел новые слова, которых не было у меня. В примечании к своему ответу проф. Д. Б. Гогоберидзе говорит: «...приведу спорную фразу полностью;[1] «При этом противники фарадее-максвелловской точки зрения игнори-

[1] «Электричество», № 42, стр. 3, 1933.

159

руют то обстоятельство, что в настоящее время даже элементы обычной материи — электроны, протоны — мыслятся в виде некоторых пакетов волн, которые должны быть понимаемы, конечно, как результат соответствующих волновых процессов, происходящих на фоне какой-то физической, а не воображаемой среды, т.-е. на фоне какой-то физической первоматерии, заполняющей все наше трехмерное пространство».

Итак, с несомненностью доказано, что слова, приписанные мне проф. Д. Б. Гогоберидзе, в действительности мной не были сказаны. Он в высокой степени своеобразно и весьма вольно обращается с тем, что обычно принято называть цитатой из статьи оппонента, и задает мне недоуменный вопрос по поводу того, что же именно обозначает моя подлинная фраза. Отвечаю ему. Мое подлинное утверждение имеет следующий смысл.

Явление дифракции материальных лучей ясно свидетельствует о том, что электроны и протоны имеют природу волнового характера, что они являются какими-то волновыми комплексами, волновыми пакетами. И, конечно, реальные волновые процессы, соответствующие электронам и протонам, должны быть понимаемы как процессы, происходящие не в каких-то многомерных пространствах сколь угодно большого числа измерений, а в реальном трехмерном пространстве. Однако методы формально-математического описания этих волновых процессов основаны на использовании таких представлений (фазовые волны в многомерных пространствах), которые не поддаются простой физической интерпретации и должны быть понимаемы лишь как чисто условное вспомогательное орудие, вполне законное при математическом анализе, но не при рассмотрении истинной природы явлений. Противники же материалистической трактовки физических явлений, привыкшие объективировать математические абстракции, склонны видеть в фазовых волнах и в многомерных пространствах сколь угодно большого числа измерений нечто подлинно реальное, нечто действительно существующее в мире физических явлений.

5. Вышеприведенный случай со спорной фразой является не единственным примером, характеризующим условия, в которых протекала наша дискуссия с проф. Д. Б. Гогоберидзе. Повторяю, именно поэтому я пришел к заключению, что предметы спора необходимо выявить с возможно большею четкостью в виде ряда принципиальных положений, сформулированных мной как несколько вопросов, на которые я отвечаю категорическим «нет». Такого рода оборот дискуссии представляется, однако, проф. Д. Б. Гогоберидзе неприемлемым, и он отказывается продолжать

дальнейшее обсуждение затронутых в этих вопросах основных физических представлений. По этому поводу можно только сказать:

La bataille est finie faute des combattants!

XV

О ПОЗИЦИИ И. Е. ТАММА В ОТНОШЕНИИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ВОЗЗРЕНИЙ ФАРАДЕЯ И МАКСВЕЛЛА [1,2]

1. В № 2 журнала «Под знаменем марксизма» за 1933 г. помещенная после статей И. Е. Тамма и В. П. Егоршина заметка «От редакции» заканчивается (стр. 263) приглашением по адресу отдельных научных работников высказаться на страницах журнала по конкретным темам, касающимся основных проблем естествознания. Этот призыв является первым мотивом написания настоящей краткой статьи. Вторым мотивом послужило то обстоятельство, что И. Е. Тамм в своей статье «О работе философов-марксистов в области физики» между прочим, высказывается определенно отрицательно по поводу моих взглядов, умалчивая об их существе. В примечании, которым И. Е. Тамм сопровождает разбор воззрений З. А. Цейтлина, он говорит следующее:[3]

«Сторонники этих взглядов любят ссылаться на авторитет некоторых ученых, в частности на Дж. Дж. Томсона и на акад. Миткевича. Дж. Дж. Томсон, 75-летний старец, имеет в прошлом громадные заслуги перед физикой, и во имя элементарных человеческих чувств я хотел бы воздержаться от рассмотрения научной ценности его работ последнего периода. Академик Миткевич имеет большие

---

[1] «Под знаменем марксизма», 1933, № б, стр. 278.

[2] Помещая настоящий отклик акад. В. Ф. Миткевича на статьи, помещенные в № 2 журнала «П. З. М.», редколлегия подчеркивает, что неустанная защита акад. В. Ф. Миткевичем положения об объективности физических процессов, происходящих в электромагнитном поле, является борьбой за основы научного материалистического понимания природных явлений. Редакция отмечает, что критикующие взгляды акад. В. Ф. Миткевича профессора Я. Н. Шпильрейн, Я. И. Френкель, И. Е. Тамм и некоторые другие или не дают прямого и ясного ответа на поставленный им вопрос или дают идеалистический ответ, отрицая объективность физических процессов в поле.

Придавая огромной значение последовательной борьбе за научное марксистско-ленинское, диалектико-материалистическое мировоззрение, редколлегия «П. З. М.» готова предоставить страницы «П. З. М» для выявления корней борющихся в современной физике двух основных философских направлений — материалистического и идеалистического — и призывает всех научных работников данной области, особенно профессоров Шпильрейна, Френкеля и Тамма, к ясному ответу на поставленный им вопрос.

[3] «П. З. М.»,. 1933 г., № 2, стр. 226.

заслуги в области электротехники, однако в области теоретических представлений действительно придерживается взглядов, довольно близких к упомянутым высказываниям т. Цейтлина».

2. Совершенно не понимаю, какие именно элементарные человеческие чувства руководили И. Е. Таммом, когда он не счел возможным хотя бы указать, что Дж. Дж. Томсон и немногие другие, в том числе я, придерживаются принципиальной фарадее-максвелловской точки зрения, согласно которой все физические взаимодействия совершаются не иначе, как при непременном участии реальной среды, окружающей взаимодействующие физические центры, и что в этом состоят сущность и основа всех наших попыток того или иного развития вытекающих из этой точки зрения следствий. И. Е. Тамм не счел далее необходимым указать, что основная материалистическая точка зрения Фарадея-Максвелла решительно антагонирует с точки зрения actio in distans, т.-е. действия на расстоянии, что эта последняя составляет характерную принципиальную установку некоторых руководящих физиков, идеалистические взгляды которых защищает И. Е. Тамм.

Вместо всего этого И. Е. Тамм совершенно бездоказательно и голословно утверждает (1. с, стр. 226), что «всякая попытка вернуть науку вспять — ко времени Фарадея и Максвелла — является по существу глубоко реакционной».

3. Ясно, конечно, что никто из сторонников принципиальных Фарадее максвелловских воззрений и не помышляет о том, чтобы игнорировать экспериментальные и теоретические достижения современной физики. Речь идет только о том, чтобы выявить корни ряда противоречий, которыми так богата современная физика, и наметить пути к их устранению. Как показывает анализ наших основных физических представлений, [1] только принципиальные фарадее-максвелловские установки могут служить тою путеводною нитью, которая, надо полагать, облегчит нам понимание сущности физических явлений и поможет созданию стройной физической теории. Необходимо, наконец, со всею определенностью признать, что доминирующая среди современных физиков-теоретиков, отрицающих материальность силовых полей, точка зрения actio in distans является в полном смысле слова псевдофизической и что в действительности никакие физические явления не могут протекать без непременного участия среды, окружающей взаимодействующие физические центры.

4. И. Е. Тамм весьма ошибается, говоря: «...в области статических и квазистационарных электромагнитных явлений, изучением которых в сущности только и ограничивался Фарадей, теория силовых линий как в первоначальной, так и в современной своей форме (теория поля) и теория дальнодействия совершенно эквивалентны: каждая из них способна вполне правильно описать всю совокупность

---

[1] В. Ф. Миткевич. Основные воззрения современной физики. Речь, читанная на торжественном годовом собрании Академии Наук СССР 2 февраля 1933 г. Отчет Академии Наук СССР за 1932 г. и сборник «Карлу Марксу Академия Наук СССР». (См. также настоящий сборник, статья II.)

явлений, отличаясь только сосредоточением внимания, выдвиганием на первый план одной определенной группы их многообразных свойств».[1]

Можно говорить об эквивалентности этих двух точек зрения лишь в отношении формально-математического описания некоторых частных сторон физических явлений. Вообще же говоря, эти точки зрения совершенно не эквивалентны и решительно исключают одна другую. [2] Это выявляется с особою очевидностью именно при рассмотрении всей совокупности того, что может происходить в действительности. Для иллюстрации сказанного я, выступая в течение ряда лет против точки зрения actio in distans, сформулировал между прочим вопрос, [3] который в наиболее общем виде сводится к следующему. Представим себе две каких-либо системы A и B, находящиеся на некотором расстоянии одна от другой и могущие физически взаимодействовать (например, два электрических заряда, два магнита или электромагнита и т. д.). Допустим далее, что система A окружена со всех сторон двумя замкнутыми поверхностями S_1 и S_2, нигде не касающимися между собой и не пересекающимися. Спрашивается:

Могут ли системы A и B так взаимодействовать одна с другой, чтобы при этом в слое, ограниченном поверхностями S_1 и S_2, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Сущность воззрений Фарадея и Максвелла, возврат к которым квалифицируется И. Е. Таммом как нечто «глубоко реакционное», диктует нам совершенно категорический ответ «нет». Я полагаю» что этот ответ «нет» безусловно обязателен для всякого физика.

Приходится, однако, констатировать, что подавляющее большинство современных руководящих физиков уклонилось от принципиальных материалистических воззрений Фарадея и Максвелла, и следовательно, их ответом на сформулированный мною вопрос, в соответствии с защищаемой этими физиками точкой зрения действия на расстоянии, необходимо признать «да».

Эти ответы «нет» и «да» в полной мере непримиримы, несовместимы. Совершенно очевидно, что невозможно создать такую физическую теорию, согласно которой в слое между поверхностями S_1 и S_2 одновременно и происходил бы некоторый физический процесс и (решительно ничего не происходило бы. Что-либо одно: или «да», или «нет»! О какой-либо эквивалентности фарадее-максвелловской точки зрения и точки зрения действия на расстоянии в рассматриваемом случае не может быть и речи. А между тем вышеприведенные утверждения И. Е. Тамма об эквивалентности обязывают

[1] И. Е. Тамм. Руководящие идеи в творчестве Фарадея, «Успехи физических наук», 1932 г., вып. I, стр. 26—27.
[2] Подробности см. в вышеупомянутой речи «Основные воззрения современной физики». (См. настоящий сборник, статья II.)
[3] Беседы о природе электрического тока, «Электричество», №№ 3; 8 и 10, 1930 г., 2-я беседа. См. также Миткевич. «Основные воззрения современной физики»,
163
его как-то синтезировать эти ответы «нет» и «да», т.-е. совместить несовместимое. В противном же случае он должен признать неправильность своих утверждений и многое изменить в своих общих физических построениях.
5. Если бы И. Е. Тамм на сформулированный мною вопрос мог ответить категорическим «нет» подобно тому, как это должны сделать все, признающие вместе с Фарадеем объективность электромагнитного поля и материальный характер происходящих в нем процессов, то он, несомненно, учел бы ряд вытекающих из этого четкого ответа «нет» логических выводов и, конечно, вынужден был бы хоть в некоторой степени поддержать основную материалистическую посылку критикуемых им взглядов З. А. Цейтлина.
6. Есть еще один весьма существенный пункт моего несогласия с принципиальными установками И. Е. Тамма. Дело в том, что он, по-видимому, полагает, [1] что существуют категории физических явлений, не связанных с какими бы то ни было пространственными перемещениями. В связи с этим и «эфир» И. Е. Тамма не является какой-то основной физической субстанцией, а представляет собою нечто, настолько не обладающее признаками физической реальности, что в отношении этого «нечто» самая мысль о пространственном перемещении кажется ему неприемлемой. Я же признаю, что всякий физический процесс, всякое сложное движение (в общефилософском смысле слова) обязательно связано с какими-либо пространственными перемещениями, которые хотя и могут не исчерпывать природы данного сложного движения, но, тем не менее, неотделимы от него и ни в коем случае не должны быть игнорируемы. Я утверждаю далее, что представление о физическом эфире, к признанию которого приводит нас фарадее-максвелловская точка зрения, должно быть совместимо с идеей о пространственных перемещениях объемных элементов этого эфира, если только мы допускаем возможность возникновения в нем каких-либо физических процессов
7. В заключение я считаю необходимым указать, что, по моему мнению, выход из того положения, в котором находится современная физическая мысль, заключается в том, чтобы, перестав оперировать такими сугубо «страшными» словами, как «глубоко реакционный», «механистический» и т. п., или такими исключительно деликатными мотивами, как «элементарные человеческие чувства», мы углубились в беспристрастный анализ наших основных физических представлений с точки зрения их вероятного соответствия тому, что может происходить в действительности. В этом отношении я особенно имею в виду представление о действии на расстоянии, псевдофизический характер которого накладывает своеобразный отпечаток на все наши построения и сильно тормозит правильное понимание явлений природы.

[1] И. Е. Тамм. «О работе философов-марксистов в области физики», П. З. М.» 1933 г., стр. 225 227.

XVI ФАРАДЕЙ «ПРОТИВ» ФАРАДЕЕВСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ [1]

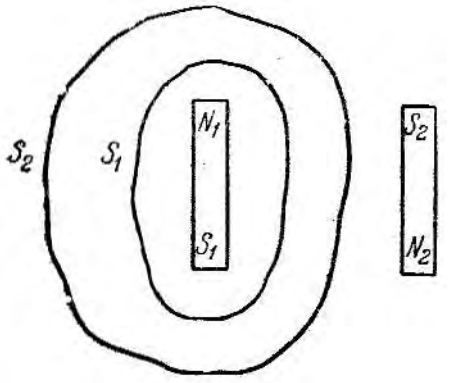
В № 9—10 журнала «Социалистическая реконструкция и наука» за 1932 г. помещена статья проф. Я. Н. Шпильрейна под заглавием «О геометрических свойствах силовых линий». Статья эта по существу является ответом на мою статью «К вопросу о природе электрического тока», [2] ранее напечатанную в настоящем журнале (1932, № 3). Я. Н. Шпильрейн стремится реабилитировать точку зрения физического действия на расстоянии и при этом приводит цитату из фарадеевских «Experimental Researches in Electricity», из которых якобы следует, что Фарадей не был принципиальным противником признания действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. Отсюда, казалось бы, вытекает, что я, категорически отрицая возможность

физического действия на расстоянии, становлюсь в положение plus royaliste que le roi meme, Если бы даже дело обстояло именно так, то все же из этого ровно ничего не следует. Ведь, во всяком случае, спор между точкой зрения действия на расстоянии и точкой зрения участия среды мы должны решать не применительно к мнениям авторитетов, а путем тщательного анализа основных конкретных случаев.

2. Как отмечает Я. Н. Шпильрейн, Фарадей не сразу пришел к своим окончательным воззрениям. Нет ничего удивительного в том, что ученый постепенно, по мере накопления опытного материала и в процессе длительного критического рассмотрения этого материала, все определеннее и определеннее высказывает свои суждения по поводу данной проблемы. Наконец, пройдя известный путь эволюции, взгляды ученого приобретают полную четкость и законченность. В связи с этим нельзя характеризовать воззрения Фарадея по вопросу о действии на расстоянии, цитируя лишь несколько строк из его работы, опубликованной в 1837 г., т.-е. почти за 20 лет до окончания его кипучей научной деятельности. Необходимо вместо этого отметить в физическом мышлении Фарадея непрерывное стремление анализировать физические явления с точки зрения возможности допущения действия на расстоянии и непрерывное возрастание убеж-

[1] «Социалистическая реконструкция и наука». 1933, № 4, стр. 47.

[2] См. настоящий сборник, статья IX



.

Фиг. 9.

денности в том, что во всех без исключения случаях разного рода взаимодействия осуществляются не иначе, как при непосредственном участии среды, окружающей взаимодействующие физические центры фарадеевскую точку зрения мы должны характеризовать совокупностью воззрений Фарадея, получивших совершенную законченность в результате всей его научной деятельности.

3. Я. И. Шпильрейн весьма определенно высказывается в пользу точки зрения физического действия на расстоянии и в заключение своей статьи говорит: «Надо думать, что новая физика сумеет разрешить трудности, связанные с представлением о действии на расстоянии, даже запаздывающем». Я очень сожалею, что Я. Н. Шпильрейн не обратил никакого внимания на те 10 вопросов, которые приведены в моей статье, и не попытался дать на них определенные ответы. Эти вопросы сформулированы мною именно для того, чтобы

выяснить несостоятельность точки зрения физического действия на расстоянии (путем рассмотрения ряда простейших конкретных случаев),. Четкие ответы «нет» на все без исключения 10 вопросов приводят нас к отрицанию действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. Из всего сказанного Я. Н. Шпильрейном приходится заключить, что он должен был бы ответить «да» по крайней мере, на некоторые из 10 вопросов и, во всяком случае, на 10-й вопрос.

4. Применительно к содержанию статьи Я. Н. Шпильрейна, в которой он пытается доказать ошибочность фарадеевского представления о физически существующих магнитных линиях, я считаю небесполезным рассмотреть следующий пример. Представим себе два магнита N_1S_1 и N_2S_2, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (фиг. 9). Допустим далее, что магнит N_1S_1

окружен со всех сторон двумя замкнутыми поверхностями S_1 и S_2, нигде не пересекающимися и не касающимися одна другой. Спрашивается: могут ли магниты N_1S_1 и N_2S_2 так взаимодействовать, чтобы при этом в слое между замкнутыми поверхностями S_1 и S_2 не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Я полагаю, что единственно допустимым ответом будет совершенно безоговорочное «нет».

Из всех рассуждений Я. Н. Шпильрейна следует, что его ответом на сформулированный мною принципиальный вопрос является «да». Если я ошибаюсь, он, конечно, не преминет меня опровергнуть.

5. Все, что говорится в защиту физического действия на рас-

166

стоянии и против фарадеевской точки зрения, эквивалентно ответу ада» на вышеприведенный вопрос и имеет такое же отношение к физической трактовке явлений природы, как и этот ответ «да». Поэтому мне представляется, что было бы нецелесообразно до выяснения общих наших установок подвергать детальному рассмотрению ряд частных соображений, высказываемых Я. Н. Шпильрейном и могущих иметь какое-либо значение тогда и только тогда, когда будет доказана необходимость и обязательность ответа «да» на вопрос, относящийся к фиг. 9. Отвлекаясь же в сторону деталей, мы можем лишь замаскировать абсолютную необходимость притти, наконец, к четкому и недвусмысленному решению: либо физическое действие на расстоянии, либо фарадеевская точка зрения, выдвигающая на первый план непременное участие среды во всех физических взаимодействиях.

XVII

ЗА ФАРАДЕЕ-МАКСВЕЛЛОВСКУЮ УСТАНОВКУ В ВОПРОСЕ О ПРИРОДЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ [1]

(По поводу выступления проф. В. А. Фока — «За подлинно научную советскую книгу») [2]

1. Как известно, современная физическая мысль переживает своего рода кризис. Это связано с накоплением огромного количества опытных данных и отсутствием общепризнанных принципиальных установок, могущих содействовать надлежащему освещению всего опытного материала и сведе'нию его в стройное целое в форме безупречной физической теории, т.-е. такой теории, которая представляла бы собою строго обоснованную и не содержащую внутренних противоречий систему взаимно согласованных физических представлений. Подобной физической теории, к сожалению, до сих пор еще не существует. Это есть идеал, к которому физическая наука стихийно стремится и к которому она мало-помалу приближается путем анализа привычных для каждой данной эпохи физических представлений, с общефилософской точки зрения, и последовательного их совершенствования в смысле возможно большего соответствия природе вещей. В этой трудной работе наиболее ответственным моментом является суждение о том, что именно происходит в реальной обстановке. Конечно, мы подчас сильно ошибаемся в своих суждениях по этому поводу, хотя бы даже и принимали во внимание все, что на данном этапе известно о физических явлениях. Мы знаем, что почти каждое новое открытие так или иначе отражается на наших физических представлениях, заставляя нас видоизменять их иногда только отчасти, а иногда и коренным образом.

2. Существует группа основных физических представлений, так сказать, первичного порядка, внимательное рассмотрение которых особенно желательно для выявления наиболее правдоподобных общих физических установок, в высокой степени необходимых для правильного развития физической мысли. Я полагаю, что в целом ряде случаев есть полная возможность, учитывая известные нам самые важные свойства явлений природы и руководствуясь чисто логическими

[1] «Социалистическая реконструкция и наука», 1934, № 8, стр. 97.

[2] Там же, № 3, стр. 132.

168

соображениями, теперь же притти к достаточно определенным выводам в отношении, по крайней мере, главнейших физических представлений. Этой проблеме я посвятил несколько своих докладов в АН СССР, изданных в 1934 г. в виде сборника под заглавием «Основные физические воззрения» (первое издание).

3. Не подлежит никакому сомнению, что результат критического пересмотра современных физических представлений должен в значительной степени зависеть от нашей принципиальной установки касательно объективности физических явлений. Из всей совокупности опытных данных о природе совершенно определенно вытекает, что мы не можем какими бы то ни было усилиями нашего сознания прекратить бытие того «нечто», которое представляет собою носителя свойств, обнаруживаемых в физических явлениях. Констатирование этого обстоятельства есть не что иное, как признание объективной реальности материального мира, существующего вне нашего сознания. Таким образом, исследователь, изучающий физические явления, располагает единственной возможностью: последовательно и без всяких отступлений проводить то положение, что предмет его изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания и что в действительности происходит не то или иное в зависимости от нашей точки зрения, а нечто совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно не подчиненное нашим точкам зрения. [1] Это есть главнейшая общая установка, которою мы обязаны руководствоваться при критическом пересмотре физических представлений,

4. В своих вышеупомянутых докладах и ряде других случаев [2] я стремился с возможно большею отчетливостью выявить первенствующее значение вопроса о необходимых условиях всякого физического взаимодействия. Действительно, во всех без исключения физических процессах мы всегда и неизменно сталкиваемся с взаимными связями отдельных физических реальностей, входящих в состав рассматриваемой их совокупности, или с взаимными связями отдельных частей одной и той же физической реальности. Вне этой общей обстановки мы не можем представить себе никакого физического процесса. Вместе с тем само собою разумеется, что наши принципиальные взгляды касательно природы физических взаимодействий должны определенным образом влиять на характер наших рассуждений при рассмотрении всякого физического явления. Из сказанного достаточно ясно вытекает исключительно важная роль наших общих представлений о том, как именно могут осуществляться физические взаимодействия, с которыми мы сталкиваемся при изучении природы.

5. Подавляющее большинство представителей современной физической науки допускает существование «физического» действия на

---

[1] См. настоящий сборник, статья II.

[2] См. Беседы о природе электрического тока, «Электричество», 1930, №№ 3, 8 м 10; К вопросу о природе электрического тока, «Сорена» 1932, № 3; «Физические основы электротехники» и т. д. (См. также настоящий сборник, статьи I, II, III.)

расстоянии. Все рассуждения ведутся в предположении, что некоторые две физические реальности могут как-то взаимодействовать одна с другою на расстояния без всякого участия какого бы то ни было физического процесса, имеющего материальную базу, происходящего в пространстве, окружающем взаимодействующие центры, и, казалось бы, долженствующего являться именно тем, через что и посредством чего осуществляется данное взаимодействие. Все современное учение об электрических, магнитных и, вообще, электромагнитных взаимодействиях основано на допущении возможности «физического» действия на расстоянии.

Я утверждаю, что идея о подобном действии на расстоянии в корне ошибочна, противоречит свойствам реального трехмерного пространства и основана на недопустимом в физических рассуждениях объектировании математических абстракций. Обо всем этом я подробно говорю в своих докладах. Один из них специально посвящен данной частной проблеме.[1]

По моему мнению, значительная доля болезненных блужданий современной физической мысли могла бы быть устранена, если бы мы перешли на путь, с особенною отчетливостью намеченный

работами Фарадея и Максвелла. Речь идет об основном воззрении, согласно которому какое бы то ни было взаимодействие между физическими центрами или, вообще говоря, системами возможно только при наличии связующего эти центры или системы физического же процесса, происходящего в окружающем их пространстве. Это воззрение выдерживает самую строгую критику и представляется единственным, соответствующим вероятной природе вещей. В то же время точка зрения «физического» действия на расстоянии привносит в физическую науку элементы чего-то, имеющего чисто мистический характер. Я неоднократно указывал на то, что при рассмотрении сущности разного рода взаимодействий, наблюдаемых в физических явлениях, не остается никакого иного выхода, кроме последовательного проведения принципиальной фарадее-максвелловской точки зрения.

6. В высокой степени естественно, что мой призыв к переходу в области наших основных физических представлений на путь, указанный Фарадеем и Максвеллом, встречает самое упорное сопротивление со стороны приверженцев общих принципиальных установок современной физики, отбросившей без достаточных оснований наиболее существенное из фарадее-максвелловских представлений, оперирующей с абсолютно пустым пространством, не заполненным какой бы то ни было материальной средой, и культивирующей точку зрения действия на расстоянии. Привычка объективировать математические абстракции [2] препятствует критическому отношению, к нашим физическим представлениям. При этом возражающие мне совершенно неправильно усматривают в моей борьбе за освобождение этих представлений от всяких элементов мистики — стремление игнорировать поистине ги-

---

[1] См. настоящий сборник, статья III. [2] Там же, статья II.

гантские достижения современной физики и вернуть ее вспять к эпохе Фарадея. По этому поводу я считаю полезным привести следующий отрывок из своего доклада — О «физическом» действии на расстоянии: [1]

«Когда мы идем в направлении некоторой определенной цели и при этом вместо того, чтобы продвигаться по открывающемуся перед нами кратчайшему пути, как-либо сбиваемся с данного правильного пути и! попадаем на извилистые окольные дороги, есть полное основание обратить на это внимание. Хотя бы даже окольные дороги и позволяли нам, несмотря на ряд встречающихся тупиков, в общем приближаться к цели, рационально как можно скорее вернуться на правильный путь. Для этого, вообще говоря, нет никакой надобности обязательно возвращаться вспять к исходной точке. Достаточно только постараться просто перейти на правильный путь.

«Точно так же дело обстоит и в отношении пропагандируемого мною возвращения на путь, указываемый нам основными установками Фарадея и Максвелла. Для этого вовсе не требуется забыть все, что дала физическая наука за последние десятилетия, и вернуться к какой-либо стадии наших знаний, соответствующей пережитым уже эпохам. Мы можем и, по моему мнению, должны, сохраняя все преимущества современного приближения к конечной цели — возможно большему познанию природы, осветить научные достижения наших дней с точки зрения Фарадея и Максвелла. Это даст только новую пищу физической мысли, откроет новые горизонты и позволит еще более быстрым темпом и более уверенно двигаться дальше в направлении стоящей перед нами цели».

В связи со сказанным уместно отметить, что современная физическая мысль по существу стремится разорвать сковывающие ее путы ложных принципиальных установок и на самом деле мало-помалу возвращается к основной фарадее-максвелловской установке касательно непременного участия среды во всех электромагнитных взаимодействиях. В этом отношении достаточно сослаться на бурное развитие волновой механики, физическая интерпретация выводов которой возможна только в том случае, если мы признаем объективную реальность материальной среды, могущей быть носителем волн. Правда, математический аппарат квантовой теории волн в общем случае пока еще оперирует с пространствами очень большого числа измерений и лишь в простейших случаях можно говорить о пакете максвелловских волн в нашем обычном трехмерном пространстве. Но если волновую картину одного электрона уже теперь можно физически интерпретировать как пакет

максвелловских волн, то совершенно невероятно, чтобы природа электронов по существу изменялась только потому, что имеется их совокупность. Опыты с дифракцией материальных лучей неопровержимо свидетельствуют о том, что в волновых пакетах мы имеем дело с какими-то реальными волновыми процессами в физическом трехмерном пространстве. Таким образом, надо признать

[1] См. настоящий сборник, статья III.

171

чисто временный, преходящий характер некоторых представлений волновой механики, вытекающих из операций с пространствами, число измерений которых беспредельно возрастает по мере увеличения количества частиц, составляющих рассматриваемую систему. В этом именно смысле высказывается и Эйнштейн в своей Спенсеровской речи, читанной им в Оксфорде в 1933 г.

7. В качестве примера, ярко иллюстрирующего, насколько трудно некоторым представителям современной физической науки отрешиться от того, что является ее наиболее слабым местом, и принять основную фарадее-максвелловскую установку, — можно привести выступление проф. В. А. Фока «За подлинно научную советскую книгу»,[1] в котором он, между прочим, критикует мою книгу «Физические основы электротехники». Эта книга характеризуется, главным образом, своим отрицательным отношением к точке зрения «физического» действия на расстоянии и более или менее последовательным проведением идеи об участии среды в электромагнитных взаимодействиях. В предисловии, во введении и в первом параграфе книги много говорится о мотивах, которые заставили ее автора проводить точку зрения Фарадея и Максвелла при рассмотрении тех процессов, с которыми мы имеем дело в электротехнике вообще, и в области электромагнитных механизмов в частности. На выдвигаемые мною мотивы проф. В. А. Фок не обратил должного внимания и все содержание книги воспринял просто как попытку перенести читателя «в давно минувшую эпоху Фарадея и Максвелла». Он не нашел в разбираемой им книге отражения многих достижений современной теоретической физики, как то: теории относительности, статистики Ферми) и т. д., и за это упрекает меня. Будучи, конечно, хорошо осведомлен, что именно из области физики является особенно важным для электротехника, он все же упустил из вида одно весьма существенное обстоятельство. Дело в том, что критикуемая им моя книга вовсе не является трактатом по физике, а представляет собою лишь учебник но одному из отделов теоретической электротехники. Современная же электротехника ни при расчете и изучении электромагнитных механизмов, ни при расчете и изучении электропередач, радиопередач и т. п., пока еще не пользуется теорией относительности, статистикой Ферми и т. д. Трудно даже представить себе, чтобы все это потребовалось электротехнику на ближайший; отрезок времени. Совершенно целесообразно поэтому удовлетвориться той суммой знаний из области новейших достижений физики, которую изучающий электротехнику в высшей школе получает из курсов физики, а в курсе «Физические основы электротехники» сосредоточить внимание на тех физических свойствах электромагнитного поля, без основательного знания которых электротехник, как таковой, не может работать ми теоретически, ни практически.

8. Вместо того чтобы критически отнестись к выдвигаемой мною на первый план фарадее-максвелловской точке зрения касательно

[1] «Социалистическая реконструкция и наука», 1934, № 3, стр. 132.

172

непременного участия среды во всех физических взаимодействиях и постараться опровергнуть мои доводы в пользу этой точки зрения, проф. В. А. Фок затрагивает эту принципиальную проблему лишь как бы мимоходом. Он, между прочим, пишет: «Правда, другие, забытые ныне, вопросы, как, например actio in distans (действие на расстоянии), встают перед автором, кажутся ему злободневными и тревожат его; но тревога эта не передается читателю, который знает ответ современной науки на эти вопросы, знает, в частности, что теория относительности не допускает

никаких мгновенных дальнодействий...». Очень сожалею, что я, по-видимому, недостаточно ярко выявил во введении к своей книге всю остроту и злободневность проблемы о «физическом» действии на расстоянии. Очевидно, благодаря именно этому проф. В. А. Фок не обратил никакого внимания на сформулированный мною вопрос, касающийся действия на расстоянии, не «встревожился», прочтя его, и не дал никакого четкого ответа. Это, впрочем, обычно всегда так бывает, когда защитники точки зрения «физического» действия на расстоянии критикуют мои физические установки. Однако дело обстоит гораздо серьезнее, чем это может показаться прочитавшему вышеприведенные слова проф. В. А. Фока. Ведь речь идет о принципиальном физическом представлении, которое не может не отражаться на всем ходе наших дальнейших рассуждений. Нельзя поэтому, критикуя мою книгу «Физические основы электротехники», без всяких доказательств, так сказать, голословно, объявить о несущественности одного из важнейших положений Фарадея и Максвелла и на этом успокоиться.

9. Вышеупомянутый сформулированный мною вопрос, который проф. В. А. Фок обошел молчанием, заключается в следующем. Представим себе какие-либо две физические системы *A* и *B*, могущие взаимодействовать одна с другой, например, два электрических заряда, два магнита или электромагнита, две радиостанции и т. п. Расстояние между *A* и *B* совершенно безразлично: оно может быть сколь угодно большим или сколь угодно малым. Спрашивается:

Могут ли системы *A* и *B* взаимодействовать одна с другой так, чтобы при этом в объеме некоторого слоя, со всех сторон окружающего, например, систему *A*, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

С точки зрения, допускающей существование «физического» действия на расстоянии, на этот вопрос необходимо ответить: «да».

С фарадее-максвелловской точки зрения безусловно необходимо ответить «нет».

В данном случае какого-либо третьего ответа на поставленный вопрос или, вообще, какого-либо компромисса между ответами «да» и «нет» быть не может. Немыслимо представить себе, чтобы в объеме рассматриваемого слоя в одно и то же время и происходил некоторый физический процесс, и решительно ничего не происходило бы. Ответы «да» и «нет» совершенно несовместимы и самым кате-

горическим образом исключают друг друга. Что-либо одно: либо «да», либо «нет».[1]

10. Я отвечаю на сформулированный мною вопрос — «нет» и признаю необходимым считаться со всеми вытекающими отсюда последствиями. Все это, конечно, накладывает совершенно определенный отпечаток на содержание моей книги «Физические основы электротехники» и является ее наиболее существенной особенностью, резко отличающей ее от многих других современных книг на ту же тему. Об этом именно проф. В. А. Фок и должен был бы открыто говорить, если бы он хотел дать подлинно научную критику моей книги. Весьма неосновательно он полагает, что мистическое, с моей точки зрения, представление о запаздывающем действии на расстоянии является правильным решением проблемы о природе электромагнитных взаимодействий. Сказанное стало бы для него совершенно очевидным, если бы он попытался дать четкий ответ на поставленный мною вопрос. С чисто физической точки зрения, запаздывающее действие на расстоянии есть такой же абсурд, как и простое мгновенное действие на расстоянии, и допустимо только в качестве метода математической трактовки физических явлений. Все это очень подробно выясняется в упоминаемом проф. В. А. Фоком введении к моей книге.

11. Чтобы уточнить позицию проф. В. А. Фока в отношении принципиальной фарадее-максвелловской точки зрения, я задам ему еще один вопрос:

Правдоподобно ли предположение, что электромагнитное поле может существовать само по себе, без всякого участия какого бы то ни было материального носителя?

Так же, как и на предыдущий вопрос, я считаю необходимым ответить категорическим «нет» по мотивам, которые достаточно развиты в упомянутом введении к моему курсу.

12. Для суждения о том, насколько безупречны соображения: проф. В. А. Фока по поводу моего курса, содержащиеся в его выступлении «За подлинно научную советскую книгу», чрезвычайно

ценно знать, какие именно ответы на поставленные мною вопросы он считает «подлинно научными». От его выступления получается такое впечатление, как будто бы он полагает, что подлинно научная советская книга, посвященная вопросам физики, должна основываться на Ответах «да» на выше сформулированные вопросы. Я надеюсь, что проф. В. А. Фок не откажется продолжить начатую им дискуссию на тему «За подлинно научную советскую книгу» и даст определенные ответы хотя бы на два вышеприведенных вопроса. Быть может он, кроме того, более или менее четко, а не мимоходом, разъяснит, в какой мере, по его мнению, допустимо в настоящее время

[1] В. Ф. Миткевич. «Физические основы электротехники», 3-е изд., 1933, см. Введение.

проводить принципиальную фарадее-максвелловскую точку зрения касательно природы всякого физического взаимодействия.

13. Я полагаю, что сказанного выше вполне достаточно для общей оценки действительного характера выступления проф. В. А. Фока. В заключение скажу только несколько слов по поводу выдвигаемого им метода борьбы с научными течениями, которые кажутся ему неправильными. Он считает, что следует воспрепятствовать изданию книг, отражающих эти течения. Несомненно, следует признать весьма серьезным и, в известном смысле, «целесообразным» рекомендуемый проф. В. А. Фоком метод чисто «физического» воздействия в отношении книг, принадлежащих перу идейных противников. Как показывает история науки, подобный метод всегда выдвигался в качестве меры борьбы с инакомыслящими, когда оказывалось невозможным действовать прямыми доводами разума. Но история повторяется!

XVIII

ВЫДЕРЖКА ИЗ ДИСКУССИИ ПО ДОКЛАДУ «О ФИЗИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ НА РАССТОЯНИИ» [1]

В. Ф. Миткевич. Я только что указал в своем докладе, что всякое уклонение от прямого ответа на поставленный мною вопрос, всякие оговорки или имеющие характер таковых оговорок рассуждения клонятся обычно к оправданию ответа «да». Должен сказать, что я спорю по этому вопросу с Яковом Ильичом Френкелем три года, и он все время уклоняется от прямого ответа. Здесь он выступил, много говорил о разных посторонних вещах, но опять-таки мне не ответил. Ясно, следовательно, что Я. И. стремится оправдать ответ «да». Все, что он говорил, только доказывает, что он допускает существование явлений, в которых Герц усматривает нечто спиритическое. Для того чтобы принять точку зрения Якова Ильича, необходимо, чтобы он опровергнул мои логические рассуждения, которые я сегодня приводил в докладе и о которых я ничего не говорил три года назад, хотя Я. И. и заявил, что ничего нового я не сказал. Нет, очень много нового я сказал, только Я. И. этого не заметил. Я полагал бы, что здесь вести длительную дискуссию вряд ли целесообразно, тем более что сейчас уже довольно поздно. Мне кажется, что эту дискуссию можно перенести на страницы «Известий Академии Наук». Пусть Я. И. на страницах «Известий» опровергнет мои логические построения. Повторяю, страницы «Известий» открыты для всех нас, и я думаю, что он сделает, наконец, мне одолжение и опровергнет мои рассуждения, а тогда мы и будем говорить по существу вопроса.

[1] Доклад этот напечатан в настоящем сборнике, статья III.

В заключение я хочу выразить свое удовлетворение по поводу того, что Я. И. Френкель эволюционировал. Три года тому назад он говорил, что реальны только электроны и ионы, а поле является лишь продуктом нашего воображения. [1] Теперь он говорит о реальности электромагнитного поля. Я очень и очень приветствую это.

[1] См. напр., стенограмму первой беседы о «Природе электрического тока», «Электричество», 1930, № 3. Выступление Я. И. Френкеля, стр. 132: «Материализация силовых линий, характерная для старой

английской школы, является своего рода «материализацией духа», потому что поле является только «духом». Реальностью, подлинной материей являются наэлектризованные частицы, ионы и электроны, а магнитные силовые линии — это продукт нашего собственного воображения, вводимый нами для удобства и наглядности». И далее: «... мы должны считать эти материальные частицы основной физической реальностью, так сказать, бытием, а поле — вторичной надстройкой, так сказать, сознанием. Более того, я сказал бы, нашим сознанием, так как мы вводим это понятие о поле, чтобы удобнее описать действие, производимое частицами друг на друга. Гипертрофирование значения поля является в сущности антропоморфизмом».

XIX

ВЫДЕРЖКИ ИЗ ДИСКУССИИ НА МАРТОВСКОЙ СЕССИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР В 1936 г.

ИЗ ВЫСТУПЛЕНИЯ В. Ф. МИТКЕВИЧА ПО ДОКЛАДУ акад. А. Ф. ИОФФЕ

Абрам Федорович, я хочу теперь поговорить на совершенно другую тему. Если так позволено будет выразиться, старый счет хочу я вам предъявить вот по какому поводу. У нас с вами есть принципиальные расхождения. Об этом мы много говорили и спорили.

Дело в том, что в общем ходе физических рассуждений и построений, которыми оперируете вы и ваши ученики, совершенно отсутствует представление о магнитном потоке как о физической реальности. Между тем это представление, введенное в науку Фарадеем, имеет громадное теоретическое и практическое значение.

Чтобы иллюстрировать это примерами, я прежде всего, остановлюсь на вопросе о сверхпроводниках. В материалах к своему докладу вы касаетесь, между прочим, сверхпроводников, указываете на некоторые их закономерности и говорите: «Эта особенность сверхпроводников теоретически еще не использована за отсутствием в данный момент, какой бы то ни было теории сверхпроводимости...» В общем получается затруднительное положение. Я утверждаю, что подобное положение создалось потому, что игнорируется представление о магнитном потоке как о физической реальности. Это представление чрезвычайно облегчает понимание того, что происходит в случае электрического тока в сверхпроводящей цепи. Ведь об этом писал еще Липпманн в своих мемуарах в 1919 г., но это осталось незамеченным (Доклады Парижской Академии Наук).

В качестве других примеров, когда представление о реально существующем магнитном потоке оказывается, безусловно, необходимым, можно назвать вопрос о механизме электромагнитной индукции тока, вопрос о природе тока, энергетическая сторона процессов, протекающих в цепи электрического тока, физическое содержание представления о векторе Пойнтинга... Столь волнующая современную физику загадка о природе фотона и, вообще, кванта электромагнит-

178

ной энергии, а также тайна строения электрона, позитрона и других элементарных физических реальностей — представились бы в совсем ином освещении с точки зрения признания магнитного потока физической реальностью. Не подлежит никакому сомнению, что эта же точка зрения может во многом помочь и при рассмотрении магнитных свойств вещества вообще, и ферромагнитных материалов в частности. Наконец, при рассмотрении физических процессов, протекающих в разного рода электромагнитных системах и механизмах, мы совершенно не можем обойтись без представления о магнитном потоке. В дииамомашииах, электродвигателях и во всех иных электромагнитных механизмах, мы, так сказать, непосредственно осязаем магнитный поток, который нам, электротехникам, представляется подлинной физической реальностью, и это мы ощущаем столь же отчетливо, как вы, Абрам Федорович, воспринимаете электрон в качестве подлинной физической реальности. Но если вы предложите вниманию инженера-электромеханика электронную теорию коммутации коллекторных машин, теорию, освобожденную от представления о магнитном потоке, то он не будет в состоянии применить на практике эту теорию, ибо она окажется зданием, искусственно возведенным на ошибочном фундаменте.

Как же смотрит возглавляемая вами, Абрам Федорович, группа советских физиков на представление о магнитном потоке? Современная физика и ваша школа утверждают, что магнитный поток реально

не существует, что это есть лишь некоторая фикция, условно допускаемая в наших физических рассуждениях ради удобства. Говоря конкретно, по вашему мнению, не происходит никакого реального, специфически магнитного процесса между полюсами постоянного магнита, скажем, в кубическом сантиметре объема, занятого внешним магнитным полем рассматриваемого магнита.

Спор о реальности или фиктивности магнитного потока сводится, в конце концов, к противопоставлению двух точек зрения: с одной стороны, точка зрения действия на расстоянии и, с другой стороны, фарадее-максвелловская точка зрения о непременном участии среды во всяком физическом воздействии. Спор имеет большое теоретическое значение. Он имеет отношение и к нашей общей философской, теоретико-познавательной установке. Спор этот имеет и сугубо практическое значение. Во всяком случае, ведь несомненно, что в каждом физическом явлении мы имеем дело с взаимодействиями отдельных физических реальностей или их частей. Других физических явлений нет. И вот этот принципиальный вопрос о природе всякого физического взаимодействия как-то совершенно игнорируется современной физикой и вашей школой, Абрам Федорович, в частности.

Вы хорошо знаете, что споря с вами и с вашими учениками на эту тему, я довел этот спор до обнаженности, до последней степени заостренности. Я отбросил все второстепенное и сосредоточил внимание на существенном. Допустим, что мы имеем, например, два магнита *A* и *B*, которые как-то взаимодействуют, притягиваются или отталкиваются. Магнит *A* окружаем двумя замкнутыми поверхностями,

не пересекающимися и не касающимися одна другой. Между ними образуется замкнутый слой.

Я спрашиваю: могут ли эти два магнита —*A* и *B* — взаимодействовать так, чтобы при этом в слое, окружающем магнит *A*, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Я утверждаю, что на этот вопрос можно ответить только «да» или «нет», третий ответ исключен. Нельзя также представить себе какого-либо синтеза этих взаимоисключающих ответов, ибо нельзя представить себе такой теории, согласно которой при взаимодействии двух магнитов *A* и *B* в этом слое, окружающем магнит *A*, одновременно и происходил бы какой-либо физический процесс, и не происходило бы ничего. Сергей Иванович Вавилов упрекал меня в том, что я неправильно поставил вопрос. Он мне не сказал, однако, как нужно правильно поставить вопрос, а я доказал в одном из своих докладов в АН, что вопрос поставлен правильно. Он мне не возражал, но, однако, и не признал себя согласным со мной. Я утверждаю, что если мы имеем две системы, два магнита, например, и они взаимодействуют между собой, то при этом в пространстве, окружающем магнит, либо может происходить, либо может не происходить соответствующий физический процесс, одно из двух. И мы имеем законное право сопоставить взаимодействие двух магнитов с вероятностью наличия каких-то физических процессов в окружающем пространстве или с вероятностью отсутствия этих процессов. Совершенно законное право, Сергей Иванович!

Профессор В. А. Фок в материалах к своему докладу на этой сессии АН сказал, что этот вопрос в современной физике не имеет никакого смысла. Это его личное мнение, характеризующее его натурфилософские установки. На этот вопрос, который я ему поставил в своем ответе, напечатанном в журнале «Социалистическая реконструкция и наука» [1], профессор В. А. Фок мне ничего не ответил, подобно тому, как и многие другие мои идейные противники нормально не отвечают четко и определенно. Те немногие физики, которые склоняются к моим позициям, сразу отвечают «нет», но те, которые не считают возможным ответить «нет», уклоняются от ответа «да», как будто бы ответ «да» чем-то нехорош. Правда, он дисквалифицирован был еще стариком, Ньютоном, который назвал абсурдом действие на расстоянии как физическое представление, объясняющее взаимодействие. Этот ответ «да» дисквалифицирован был и Герцем, который указал, что наука, привносящая действие на расстояний для объяснения физических явлений, тем самым прибегает к чему-то спиритическому. Быть может поэтому мои идейные противники боятся сказать «да» и, не соглашаясь со мной, отказываются от ответа. Вместо того чтобы ответить мне, нередко говорят, что я тяну науку назад на сто лет, ко времени Фарадея, несмотря на то, что я совсем ясно в своих докладах указывал, что я к этому вовсе не стремлюсь.

[1] См. настоящий сборник, статья XVII.

180

Наоборот, принимая полностью все фактические достижения современной науки, мы должны не бояться критиковать наши основные физические установки и исправлять то, что нужно. И если старые установки Фарадея-Максвелла, насчитывающие столетнюю с лишним давность, в принципе с философской и теоретико-познавательной точки зрения правильны, мы должны немножко пересмотреть принципиальные установки современной физики, и мы ничего при этом не потеряем, а наоборот — получим очень много нового и ценного.

Вы, Абрам Федорович, во время дискуссии на тему о природе электрического тока, имевшей место несколько лет тому назад, приняли сторону моего самого непримиримого противника, кажется, здесь присутствующего Якова Ильича Френкеля. Вы сказали, что он логически рассуждает, а я — не совсем логически. Правда, сам Я. И. Френкель, под влиянием этих споров со мной, и я этим горжусь, эволюционировал очень сильно за последнее время. Так, в 1930 г. он говорил: «Материализация силовых линий, характерная для старой английской школы, является своего рода «материализацией духа», потому, что поле является только «духом». Реальностью, подлинной материей являются наэлектризованные частицы, ионы и электроны, а магнитные силовые линии — это продукт нашего собственного воображения, вводимый нами для удобства и наглядности». И далее: «... мы должны считать эти материальные частицы основной физической реальностью, так сказать, бытием, а поле — вторичной надстройкой, так сказать, сознанием. Более того, я сказал бы, нашим сознанием, так как мы вводим это понятие о поле, чтобы удобнее описать действие, производимое частицами друг на друга. Гипертрофирование значения поля является в сущности антропоморфизмом». [1]

По этой причине, конечно, он должен был бы ответить «да» на мой вопрос. Но он упорно уклонялся от четкого ответа. Понять, однако, нужно было так, что он говорит «да». В 1934 г., через 4 года, во время дискуссии по моему докладу в Академии Наук Яков Ильич уже эволюционировал. [2] Он сильно изменил свое мнение. В частности, касаясь того, что могут быть две точки зрения, «Substanztheorie» и «Feldtheorie», он говорит: «С точки зрения второй теории поле есть первичное понятие, а элементы материи — его продукты». И дальше он говорит: «Я лично склоняюсь в пользу «Feldtheorie». Казалось бы, он должен был мне просто и открыто ответить: согласен с тобою, отвечаю «нет». Но ему что-то не позволяет откровенно ответить.

Многие из ваших учеников, Абрам Федорович, и примыкающие к вашей школе выступали против меня, как, например, профессор И. Е. Тамм. Он решительно выступил с утверждением, что точка зрения действия на расстоянии совершенно эквивалентна точке зрения фарадеевской и что обе они одинаково хорошо описывают все явления. Я ему в своем ответе, [3] напечатанном в журнале «Под

[1] См. например, стенограмму первой беседы о «Природе электрического тока», «Электричество», 1930, № 3. Выступление Я. И. Френкеля, стр. 132.

[2] См. настоящий сборник, статья XVIII.

[3] Там же, статья XV.

181

знаменем марксизма», указал, что это совсем не так, что его мнение ошибочно, и задал вышеуказанный мой вопрос. Ответа не последовало. Я. И. Шпильрейн, тоже мой жестокий противник, также выступает в защиту действия на расстоянии. В своем ответе [1] на страницах журнала «Сорена» я задал ему свой вопрос. Я. И. Шпильрейн молчит, ничего не отвечает. И профессор В. А. Фок на страницах журнала «Сорена» выступил в защиту действия на расстоянии: он считает, что современная физика может вполне удовлетвориться запаздывающим действием на расстоянии, как будто бы это более понятно, чем какое-нибудь простое действие на расстоянии. Я ему в своем ответе [2] опять задал указанный выше вопрос. В ответ — опять молчание. Профессор Б. М. Гессен во время дискуссии о природе электричества весьма неопределенно высказался по поводу действия на расстоянии — ни за, ни против. Как он думает — непонятно. Замечательно то, что никто

из моих идейных противников не желает четко и кратко ответить на мой вопрос. Редакция журнала «Под знаменем марксизма» в примечании к моей статье, [3] в которой я отвечал И. Е. Тамму, специально персонально обратилась к профессорам Френкелю, Шпильрейну и Тамму с просьбой ответить на мой вопрос. Ответа опять не последовало.

Наконец, я напомню Абраму Федоровичу, что во время одного из докладов Академии Наук в 1933 г. я, говоря о «физическом» действии на расстоянии (извините — «физическом» я пишу в кавычках, иронически, ибо считаю, что этого реально не может быть)—в заключительной части сказал следующее;

«Итак, на основании всего изложенного, я утверждаю, что господствующее теперь в науке привычное представление о действии на расстоянии, являясь по существу лишь математической абстракцией, иногда полезной и ценной, не должно быть объективируемо в качестве первичного физического явления, т.-е. не должно трактоваться в качестве «физического» действия на расстоянии, так как это никоим образом не может соответствовать тому, что происходит в действительности.

«Несмотря на, казалось бы, полную очевидность псевдофизического характера идеи о действии на расстоянии, она продолжает играть роль привычного основного фона современной физической мысли и накладывает на нее своеобразный отпечаток.

«Все мои принципиальные физические установки прямо или косвенно, явно или неявно, вытекают из категорического отрицания допустимости «физического» действия на расстоянии. Должен признаться, однако, что в этом отношении у меня пока имеются, к сожалению, более или менее серьезные расхождения со многими моими коллегами по Академии Наук, в том числе, например, с академиками А. Ф. Иоффе, С. И. Вавиловым, с членами-корреспондентами Академии — Я. Н. Шпильрейиом, Я. И. Френкелем, И. Е. Таммом и Г. А. Гамовым. Степень указанного расхождения варьирует в очень широких пределах,

---

[1] См. настоящий сборник, статья XVI.

[2] Там же, статья XVII,

[3] Там же, статья XV.

от некоторого лишь различия и четкости основных установок до полной противоположности.

«Едва ли может быть сомнение в том, что необходимо, наконец, подвергнуть тщательному обсуждению важнейший принципиальный вопрос о допустимости «физического» действия на расстоянии. Я совершенно уверен, что наша совместная работа в Академии Наук предоставляет для этого все возможности, и, в частности, страницы «Известий» Академии открыты каждому из нас для изложения суждения по данному поводу.

«Путем обмена мнений мы придем, конечно, к объединяющим нас основным установкам. Мок попытки вызвать в стенах Академии обмен: мнений по этому вопросу были до сих пор безрезультатны».

Ни от, кого никакого ответа, к сожалению, не последовало.

Так вот, дорогой Абрам Федорович, в порядке личного одолжения, примите мой вопрос и ответьте на него: «да» или «нет». Не тратьте времени на длинные объяснения. Меня интересует только «да» или «нет».

ВЫСТУПЛЕНИЕ В. Ф. МИТКЕВИЧА ПО ДОКЛАДУ акад. С. И. ВАВИЛОВА

Здесь с этой кафедры *я* выступал по поводу доклада А. Ф. Иоффе. Я выступал в защиту представления о магнитном потоке как о некоторой физической реальности, как о некотором реальном процессе. Я делал ряд упреков Абраму Федоровичу, возглавляемой им школе и примыкающим к его школе физикам по тому поводу, что они считают магнитный поток простой фикцией, которую мы иногда допускаем в качестве якобы лишь удобного метода для рассмотрения физических явлений. Я указал, что *мы* этим обезоруживаем физическую мысль при рассмотрении целого ряда физических процессов и явлений, при рассмотрении природы целого ряда физических

реальностей. Я указывал на то, что эта установка А. Ф. и его школы весьма ошибочна и вредно отражается на дальнейшем развитии понимания природы вещей.

С глубоким прискорбием должен констатировать тот факт, что А. Ф. уклонился от ответа мне, он ничего не сказал. Правда, здесь вместо него выступал профессор И. Е. Тамм. Его выступление было в высокой степени содержательным в том отношении, что оно четко и определенно выявило его натурфилософскую установку.

Большинству присутствующих известно, вероятно, что спор о реальности магнитного потока я свел к некоторому вопросу, имеющему, вообще говоря, философский характер. Вопрос — напомню — такой: могут ли два магнита, *A* и *B*, так взаимодействовать друг с другом, чтобы при этом в некотором слое, окружающем магнит *A*, не происходило какого бы то ни было физического процесса? Это —вопрос о дальнодействии. Вопрос этот — я утверждаю—может допускать только два ответа: «да» или «нет»; при исключенном третьем. Тот или иной ответ предопределяет в дальнейшем наше отношение к вопросу о реальности магнитного потока.

183

Так вот, выступавший здесь в защиту дальнодействия проф. И. Е. Тамм сравнивал поставленный мною вопрос с вопросом о том, какого цвета меридиан — красного или зеленого. Я не думаю, чтобы стоило (для большинства присутствующих ясно, что не стоит) дискутировать по вопросу о том, что между сформулированным мною вопросом и вопросом профессора И. Е. Тамма большая разница. Я заниматься разбором этого не буду. Предоставляю автору вопроса о меридиане заняться исследованием, какого цвета меридиан — красного или зеленого, или, может быть, цвета хамелеона.

Другой мой яростный противник, мой друг, Яков Ильич Френкель, в 1930 г., споря со мной на тему о дальнодействии, пытался (ему подражает проф. И. Е. Тамм) свести вопрос, мною сформулированный, к вопросу такого рода: есть ли у «чорта» хвост или нет. Как я в своем выступлении третьего дня показал, Я. И. Френкель с течением времени изменил под влиянием моего с ним спора и борьбы свою установку, и сейчас, по существу, он начал уже со мной говорить о том, есть ли у «чорта» хвост или нет. Я не вижу Якова Ильича здесь среди присутствующих, но убежден, что он со мной согласится, когда я скажу, что у этого «чорта» — и действия на расстоянии — хвост, если и не совсем оторван, то в значительной степени уже надорван. Но так или иначе, очень прискорбно, что А. Ф. Иоффе уклонился от ответа на мой вопрос.

Обращаясь к докладу С. И. Вавилова, я должен повторить отчасти то, что говорил по докладу А. Ф. Иоффе, а Именно, что представление о магнитном потоке, как о физической реальности, могло бы нам очень помочь при рассмотрении строения фотона, электрона, позитрона и других элементарных физических реальностей, а также при рассмотрении природы таинственного процесса превращения фотона в пару: позитрон и электрон. С. И. Вавилов является одним из моих противников в отношении натурфилософских установок. Он многое теряет оттого, что игнорирует в своих физических рассуждениях, магнитный поток как одну из основных физических реальностей.

В заключение моего краткого выступления, Сергей Иванович, позвольте мне обратиться к вам, как к моему идейному противнику, опять-таки с этим принципиальным вопросом: могут ли два магнита *A* и *B* так взаимодействовать, чтобы при этом в некотором слое, окружающем магнит *A*, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

ИЗ ВЫСТУПЛЕНИЯ В. Ф. МИТКЕВИЧА ПО ДОКЛАДУ
акад. Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО О ПЛАНЕ РАБОТ АКАДЕМИИ НАУК СССР НА 1936 г.

Переходя теперь к программе работ АН по Группе философии, считаю долгом отметить, что с чувством глубокого удовлетворения я нашел здесь следующие указания: «надо продолжить ту критику

184

буржуазных философских теорий в трактовке ведущих проблем физики, химии и биологии, которая была начата классической работой В. И. Ленина в его знаменитом труде «Материализм и эмпириокритицизм».

Не подлежит никакому сомнению, что эти указания совершенно бесспорны. Я бы предложил только заменить слова «надо продолжить» словами «надо усиленно продолжить». Действительно, то, что делалось в стенах АН в этом отношении до сих пор, далеко не соответствовало важности задачи. Я на себе самом это испытал. В течение ряда лет, как известно, я веду упорную борьбу за пересмотр основных физических воззрений, которыми руководствуются ведущие советские физики. По мотивам, которые я старался выявить в ряде своих докладов и выступлений в АН, я позволяю себе утверждать, что наши ведущие физики в подавляющем большинстве случаев придерживаются ошибочных натурфилософских установок. Это не может не тормозить развития физической мысли у нас в Союзе, препятствует ей отрешиться от слепого следования зарубежным натурфилософским течениям и выйти на самостоятельный путь.

В своей долголетней борьбе я чувствовал себя почти совершенно одиноким. Практически, никто из ведущих физиков до сих пор не поддерживал меня в открытых выступлениях.

Насколько трудно бороться за пересмотр господствующих в настоящее время в науке ошибочных установок, — это явствует, например, из того, что в своих заключительных выступлениях и А. Ф. Иоффе, и С. И. Вавилов красноречиво уклонились от ответа на мой вопрос, поставленный им в упор и долженствовавший выявить их принципиальную натурфилософскую установку. Особенно мне непонятно уклонение от ответа со стороны А. Ф. Иоффе. Мне казалось, что мы с ним придерживаемся, в общем, очень близких принципиальных установок и расходимся только во второстепенных деталях. Дело в том, что в своем курсе физики, предназначенном для высшей школы и изданном в последние годы, А. Ф. Иоффе совершенно определенно учит студентов, что объяснения электромагнитных явлений необходимо искать на почве признания существования эфира, заполняющего физическое пространство. Мне казалось, что отсюда один шаг до отрицания действия на расстоянии.

Как бы то ни было, но А. Ф. Иоффе уклонился от ответа на мой вопрос. Вместо него выступал здесь проф. И. Е. Тамм, который, возражая мне, совершенно нелогично сравнивал мой вопрос, опорочивающий точку зрения действия на расстоянии, с вопросом о том, какого цвета меридиан. Воздавая должное остроумию проф. И. Е. Тамма, я вместе с тем считал бы необходимым заметить, однако, что всякая шутка есть вещь обоюдоострая. Условно одобряя сравнение, сделанное проф. И, Е. Таммом, я частично соглашаюсь с ним и охотно допускаю, что сформулированный мною вопрос действительно в некотором отношении можно уподобить вопросу о том, какого цвета меридиан. Но только, я спрашиваю своих идейных противни-

ков: какого «цвета» их меридианы? Окраска моего меридиана всем присутствующим в достаточной степени ясна. Я думаю, всем также достаточно ясно, какого цвета меридиан проф. И. Е. Тамма А вот только непонятно, какого цвета меридианы А. Ф. Иоффе и С. И. Вавилова: красного они цвета или зеленого.

Я полагаю, что усиление деятельности Группы философии поможет нам, наконец, это выяснить.

XX

ПО ПОВОДУ СТАТЬИ акад. А. Ф. ИОФФЕ «О ПОЛОЖЕНИИ НА ФИЛОСОФСКОМ ФРОНТЕ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ» [1]

1. Мотивом настоящего моего выступления является то обстоятельство, что А. Ф. Иоффе в своей статье, формально представляющей собой ответ А. А. Максимову, по существу, пытается возразить не только ему, но и мне и всем, кто в большей или меньшей степени разделяет мои установки в отношении основных физических воззрений. Статья А. Ф. Иоффе выводит за пределы его личных высказываний по поводу начавшейся на страницах «П. З. М.» дискуссии. Он неоднократно напоминает, что говорит не только о себе, но и о С. И. Вавилове, В. А. Фоке, Я. И. Френкеле и И. Е. Тамме. Поэтому в дальнейшем я буду иметь в виду всю защищаемую им группу физиков.

2. Акад. Н. Я. Марр совершенно правильно проводил ту мысль, что между нашим языком и нашим мышлением существует глубокая связь. Он не отделял языка от мышления и именно поэтому создал новое учение о языке. По его инициативе при Академии Наук СССР был организован Институт

языка и мышления. Исследования Н. Я. Марра в области языкознания в высокой степени поучительны в отношении соответствия между языком и мышлением как у первобытного человека, так и у человека, стоящего на более высокой ступени развития. Лексикон слов, которыми пользуется в своей жизни и деятельности та или иная группа людей, дает много материала для суждения о характере мышления этих людей и о степени их общей культурности. Это положение оказывается справедливым всегда и везде. Всякая группа людей, обособленная в социальном или ином, отношении, имеет свой собственный лексикон слов, необходимых ей для выражения своих мыслей. Мы знаем примеры даже специфических жаргонов, которыми пользуются некоторые группы людей, объединенных общностью интересов. Таким образом, известную поговорку о друзьях можно перефразировать так: «Скажи мне, каков лексикон слов, которыми ты пользуешься, и я скажу, кто ты».

В связи с изложенным приобретает известный интерес тот свое-

---

[1] Напечатано (в порядке обсуждения) в журнале «Под знаменем марксизма», 1937, № 11—12, стр. 144—156.

образный и несколько необычный лексикон, которым обогатили язык научно-философской дискуссии А. Ф. Иоффе и его единомышленники. Например, в рассматриваемом выступлении А. Ф. Иоффе против его идейных противников встречаются, между прочим, следующие слова и выражения:

Наивные.
Вроде киселя.
Копаться в «мистических» проблемах.
Устранился от живой науки.
Эфирный кисель.
Наивность.
Колесница Ильи-пророка.
Наивный оппонент.
Кисельный эфир.
Рекламируемый.
Замаскировать математическим туманом.
Нелепые предпосылки.
Открещивается от математики.
Стремясь скрыть от советской молодежи...
Стремясь... сохранить свой авторитет...
Отгородились от новых идей. Недостойная клевета.
Реакционная кучка.
Поражающая безграмотность.
Сознательные извращения.
Вопиющая путаница.
Чудовищный по своей нелепости.
Наивное незнание.
Физическое невежество.
Развязная безграмотность.
Недоучившийся физике «философ».
Сам... не разобрался.
Явная недобросовестность.
Клевета.
В обывательски извращенном виде.
Попахивающий славянофильским душком.

Легкомысленные обвинения.
Кружковые интересы.
Вздорная клевета.
Путая физику с философией...
Легкомысленная статья.
Научная отсталость.
Подобными словами и оборотами речи изобилует выступление акад. А. Ф. Иоффе. Такой же язык, в одних случаях более утонченный, в других случаях еще более яркий, фигурирует и в полемических выступлениях С. И. Вавилова, В. А. Фока, И. Е. Тамма и Я. И. Френкеля.
188
Этот богатый и весьма образный лексикон имеет особенное значение в двух отношениях.
Во-первых, большое количество специфических и не применявшихся до сих пор слов и оборотов речи, введенных определенной группой советских физиков в язык научно-философской дискуссии, переходит в качественную характеристику физического мышления, оказывающегося неспособным к четкому и недвусмысленному формулированию суждений по существу научно-философских вопросов, стоящих перед нами.
Во-вторых, прибегая к использованию данного лексикона, обычно исключаемого из всякой серьезной научной дискуссии, указанная группа физиков доказывает этим только отсутствие какой-либо возможности опровергнуть доводы ее идейных противников и откровенно выдает самой себе, так сказать, testimonium paupertatis.
3. Коснувшись лексикона, к использованию которого был вынужден прибегнуть А. Ф. Иоффе, не сумевший найти какой-либо иной выход из создавшегося положений, я перейду к рассмотрению также весьма своеобразных полемических приемов, применяемых как самим
А. Ф. Иоффе, так и его единомышленниками С. И. Вавиловым,
В. А. Фоком, Я. И. Френкелем и И. Е. Таммом. Систематически уклоняясь от обсуждения принципиальных натурфилософских установок, господствующих в современном физическом мышлении, они стремятся представить дело так, как будто бы их идейные противники игнорируют все фактические достижения физической науки за последние годы и «тянут науку назад». В действительности ничего подобного нет. Полностью признавая огромное значение всех открытий, сделанных физической наукой и представляющих собой весьма существенный шаг вперед на пути познания явлений природы, высоко ценя фактические достижения советских физиков (А. Ф. Иоффе,
С. И. Вавилова и других), я и, конечно, все идейные противники группы, возглавляемой А. Ф. Иоффе и С. И. Вавиловым, возражаем только против ошибочных методов истолкования физических процессов, против тех методов, которые ведут к физическому идеализму, затрудняют развитие представлений, могущих соответствовать действительной природе явлений, и поэтому тормозят дальнейший прогресс физической науки.
Вопреки многократно повторяющимся утверждениям моих критиков я никогда и нигде в своих выступлениях не говорил, будто бы следует отвергнуть фактические достижения современной физики. Наоборот, я полностью признавал и признаю эти достижения. [1] В виде примера я приведу несколько отрывков из своего сборника «Основные физические воззрения»:
«Перейдем теперь к рассмотрению одного из самых важных представлений, с которыми оперирует современная физика. Речь идет об идее квантования во всех физических процессах вообще и в об-

[1] Акад. В. Ф. Миткевич, «Основные физические воззрения», стр. 32 41, 42, 44, 146, и т. д. Изд. Академии Наук СССР. М, и Л. 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, статьи II, III, XVII.)
189
ласти электромагнитных процессов в частности. При этом термин «квантование» я понимаю в самом широком смысле. Трудно подыскать достаточно яркие слова для того, чтобы с необходимой отчетливостью выявить громадное значение этого основного воззрения, которое должно признать

поистине величайшим достижением современной физики, дающим нам ключ к углубленному пониманию явлений природы» (1933 г.).

«Из всего предыдущего вытекает, что создание физической теории, охватывающей самый широкий круг явлений, затруднительно и, вероятно, совершенно невозможно на почве отрицания первенствующего значения среды и на основе объектирования действия на расстоянии в качестве первичного физического явления. До настоящего времени общей физической теории еще не существует в законченном виде. Но можно с полным правом высказать уверенность, что в будущем физическая мысль возвратится к принципиальным воззрениям Фарадея и Максвелла, разовьет их путем учета всех новейших достижений и завершит построение общей физической теории. Действительно, уже намечается определенный, еще не достаточно осознанный, сдвиг в этом направлении. В подтверждение сказанного достаточно напомнить хотя бы только о квантовой теории волн, о метаморфозе наших представлений об электроне и о дифракции материальных лучей. Но, во всяком случае, фарадее-максвелловская точка зрения по вопросу о непременном участии среды во всех физических процессах представляется единственной мыслимой путеводной нитью для дальнейшего успешного развития современной физики, так много сделавшей и так много обещающей сделать» (1933 г.).

«Физическая реальность, называемая электрическим зарядом, понимается в наши дни несколько иначе, чем 100 лет тому назад. Даже за последние 10 лет произошли несомненные сдвиги в этом отношении» (1933 г.).

«В связи со сказанным уместно отметить, что современная физическая мысль по существу стремится разорвать сковывающие ее путы ложных принципиальных установок и на самом деле мало-помалу возвращается к основной фарадее-максвелловской установке касательно непременного участия среды во всех электромагнитных взаимодействиях. В этом отношении достаточно сослаться на бурное развитие волновой механики, физическая интерпретация выводов которой возможна только в том случае, если мы признаем объективную реальность материальной среды, могущей быть носителем волн. Правда, математический аппарат квантовой теории волн в общем случае пока еще оперирует с пространствами очень большого числа измерений, и лишь в простейших случаях можно говорить о пакете максвелловских волн в нашем обычном трехмерном пространстве. Но если волновую картину одного электрона уже теперь можно физически интерпретировать как пакет максвелловских волн, то совершенно невероятно, чтобы природа электронов по существу изменялась только потому, что имеется их совокупность. Опыты с диффракцией материальных лучей неопровержимо свидетельствуют

190

о том, что в волновых пакетах мы имеем дело с какими-то реальными волновыми процессами в физическом трехмерном пространстве. Таким образом, надо признать чисто временный, преходящий характер некоторых представлений волновой механики, вытекающих из операций с пространствами, число измерений которых беспредельно возрастает по мере увеличения количества частиц, составляющих рассматриваемую систему. В этом именно смысле высказывается и Эйнштейн в своей Спенсеровской речи, читанной им в Оксфорде в 1933 г.» (1934 г.).

«Было бы в высокой степени ошибочно усматривать в качестве мотива моей борьбы в защиту фарадее-максвелловской принципиальной установки и против точки зрения «физического» действия на расстоянии какое-либо стремление вернуть науку вспять к эпохе Фарадея» (1933 г.).

Первые три отрывка и последний взяты из моих докладов, читанных в заседаниях Академии Наук СССР в присутствии А. Ф. Иоффе. Как после этого следует понимать его утверждение: «...и вот группа Тимирязева — Кастерина — Миткевича берется за задачу вернуть физику по всему фронту ее развития назад в XIX век» ? Лично я борюсь как раз за движение вперед, за наиболее успешное дальнейшее развитие «современной физики, так много сделавшей и так много обещающей сделать». Не сомневаюсь в том, что и другие противники принципиальных установок группы физиков, возглавляемой А. Ф. Иоффе и С. И. Вавиловым, стремятся именно к этому же.

4. А. Ф. Иоффе неоднократно подчеркивает, будто бы я являюсь противником применения математики при анализе физических явлений. В статье А. Ф. Иоффе встречаются, например, такие места:

«Отрицая пользу математического метода в анализе физических явлений, акад. Миткевич считает столь же бесполезным изучать новые экспериментальные факты и их обобщения».

«Мне борьба акад. Миткевича за наглядность, против математических теорий, представляется в таком виде...». «Долой математику!..» (якобы лозунг Миткевича). «Акад. Миткевич открещивается от математики». Насколько это соответствует действительности, лучше всего можно видеть из нижеследующих, известных А. Ф. Иоффе отрывков из моего сборника «Основные физические воззрения». [1]

«Не подлежит никакому сомнению, что математика есть великое орудие, которым физик наших дней может и должен пользоваться при изучении явлений природы» (1931 г.).

«Понятия и образы, возникшие на математической почве и являвшиеся весьма полезными и ценными в процессе анализа, нередко трактовались затем в виде каких-то реальностей или в виде неотъемлемых свойств, присущих данным реальностям по самой природе вещей. Таким образом в физическое мышление проникли представ-

[1] Акад. В. Ф. Миткевич, «Основные физические воззрения», стр. 16, 19, 26, 51. 1936, 2-е изд. (См. настоящий сборник, статья I, II, III.)

191

леиия, которые можно назвать объективированными математическими абстракциями. И все это иногда допускалось без достаточного обследования новых представлений применительно к выяснению их физического значения и к их сообразованию с тем, что может происходить в действительности. Упускалось из виду, в отдельных случаях, и то исключительно важное обстоятельство, что изучение некоторой физической проблемы может допускать использование весьма разнообразных методов математического анализа, каждый из которых требует введения своих особых вспомогательных понятий» (1933 г.).

«Широкое и плодотворное использование высшего анализа при изучении физических явлений, необычайная утонченность и, я бы сказал, изящество многих методов этого анализа естественно, приводят к тому, что ученые, работающие в области физики и, вообще говоря, весьма совершенно владеющие всем аппаратом высшего анализа, до известной степени непроизвольно объективируют формы и образы, являющиеся чистыми математическими абстракциями» (1933 г.).

«Сказанное выше нисколько не противоречит закономерности и целесообразности использования идеи о многомерных пространствах в процессе математических операций, к которым иногда весьма полезно и даже необходимо прибегать в некоторых специальных отделах современной теоретической физики. В области высшего анализа не может быть никаких ограничений для формально правильного развития математических представлений. Но в области нашего физического мышления, в особенности при рассмотрении вопроса о вероятной природе физических явлений, несомненно, приходится считаться с некоторыми ограничениями, вытекающими из наших общих принципиальных установок, и не выходить за пределы нашей нормальной пространственно-временной непрерывности, в которой эти явления имеют место» (1933 г.).

Таким образом, с моей стороны нет никакой недооценки большого значения математических методов в изучении физических явлений. Мне можно было бы возражать только по поводу того, что я протестую против объективирования некоторых математических абстракций без достаточных к тому оснований или что я считаю необходимым физическое осмысление результатов математического анализа явлений природы. На каком же основании А. Ф. Иоффе приписывает мне лозунг «Долой математику!», который никак не вытекает из моих высказываний относительно роли математики в физической науке?

5. К подобной же категории полемических приемов А. Ф. Иоффе принадлежит и ряд других его выступлений против меня, в которых он приписывает мне то, чего я никогда не говорил, или утверждает то, что не соответствует действительности. Приведу несколько примеров.

Говоря о статье А. А. Максимова (помещенной в «П. З. М.» № 7 за 1937 т.), А. Ф. Иоффе утверждает следующее:

192

«Вторая часть исходит из заявления акад. Миткевича, что признание или непризнание реальности магнитных силовых трубок определяет философскую и политическую физиономию ученого (цвет его меридиана, по выражению акад. Миткевича)».

О такого рода «заявлении акад. Миткевича» я не слыхал. Авторство этого «заявления» принадлежит самому А. Ф. Иоффе, который объединил в одной фразе мои слова, сказанные в разное время и по разным поводам.

Затем, А. Ф. Иоффе, говоря об электронах, утверждает:

«Акад. Миткевич и их не признает».

Должен заверить автора этих слов, что акад. Миткевич и об этом не слыхал. По-видимому, А. Ф. Иоффе склонен усматривать непризнание электронов в моей попытке представить себе строение электрона.

Далее, касаясь вопроса о действии на расстоянии, А. Ф. Иоффе указывает:

«Сначала о борьбе самого акад. Миткевича против теории дальнодействия, которая, по его мнению, охватила современную физику. Это — заблуждение. Современная электродинамика вовсе не исходит из мгновенной передачи действия на расстояние: она пользуется методом запаздывающего потенциала, выражающего распространение процесса от участка к участку с конечной скоростью».

Во-первых, А. Ф. Иоффе хорошо известно,[1] что я всегда выступал не против допущения именно мгновенной передачи действия на расстоянии, а против, допущения действия на расстоянии вообще, безразлично, мгновенного или запаздывающего. (Я имею в виду признание какого бы то ни было действия на расстоянии в качестве первичного физического явления.) Считая представление о действии на расстоянии чисто математической абстракцией, которая вполне законно может быть используема только в математическом анализе явлений природы, я протестовал против введения этого представления в наше физическое мышление.

Во-вторых, по поводу моего якобы «заблуждения», что «теория дальнодействия... охватила современную физику», я считаю полезным напомнить А. Ф. Иоффе, между прочим, следующее. Во время первой беседы о природе электрического тока,[2] имевшей место в Ленинградском политехническом институте под председательством того же А. Ф. Иоффе в 1929 г., Я. И. Френкель открыто защищал представление о действии на расстоянии и совершенно определенно упрекал Фарадея за то, что он «не мог себе представить действия на расстоянии». Присутствовавший при этом А. Ф. Иоффе в своем выступлении не протестовал против идеалистической установки

---

[1] Между прочим, я говорил об этом в присутствии А. Ф. Иоффе во время своих докладов в Академии Наук СССР в 1933 году. См, мой сборник «Основные физические воззрения», стр. 29—31, 47—48, 1936, 2-е изд. (См. настоящий сборник, статьи II, III.)

[2] См. стенограммы трех бесед в журнале «Электричество» №№ 3, 8 и 10 за 1930 год.

193

Я. И. Френкеля, а, наоборот, в основном его поддерживал. Во время второй и третьей бесед Я. И. Френкель еще более настойчиво защищал точку зрения действия на расстоянии. Я. Г. Дорфман, ученик А, Ф. Иоффе, во время второй беседы весьма четко защищал точку зрения действия на расстоянии в качестве физического представления. В своих выступлениях по другому поводу и И. Е. Тамм [1] и В. А. Фок [2] также высказывались в том смысле, что теория запаздывающего потенциала вполне объясняет физические взаимодействия, После того как в возражении В. А. Фоку,[3] я предложил ему мой вопрос, касающийся взаимодействия двух систем, он в своем докладе на мартовской сессии Академии Наук СССР (1936 г.), с одной стороны утверждает: «...наша теория

взаимодействия между частицами является последовательным проведением идеи близкодействия...», но, с другой стороны, указывает: «Ведь согласно квантовой механике световые и гравитационные кванты не могут быть даже строго локализованы в пространстве и времени, так что говорить о передаче взаимодействия от точки к точке через посредство промежуточной среды (эфира) не приходится». Последние слова, являющиеся результатом необоснованного объектирования математических абстракций, совершенно опровергают справедливость первого утверждения В. А. Фока, установки которого по существу не отличаются от установок Я. И. Френкеля.[4]

Итак, сделанный мне упрек в «заблуждении» я имею все основания объяснить заблуждением и забывчивостью самого же А. Ф. Иоффе.

В заключение краткого обзора примеров, освещающих полемические приемы А. Ф. Иоффе, я остановлюсь еще на его упреке в стремлении «скрыть от советской молодежи передовые идеи ведущих ученых и сохранить, таким образом, свой авторитет». Что касается авторитета, то, во всяком случае, он не поддерживается, использованием полемических приемов, которые я выше охарактеризовал и для которых предоставляю самому А. Ф. Иоффе подыскать из его лексикона наиболее подходящую квалификацию. По поводу же стремления что-то якобы скрыть от советской молодежи считаю долгом сказать следующее. Совершенно напрасно А. Ф. Иоффе такого плохого мнения о нашей советской молодежи, будто бы она настолько несознательна, что от нее можно скрыть что-либо. Советская молодежь во многом сама очень хорошо разбирается.

6. Статья А. Ф. Иоффе изобилует заявлениями и утверждениями, качественно вполне подобными разобранным выше. Коснусь еще некоторых его особых высказываний.

---

[1] См. журнал «Успехи физических наук». Вып. 1-й, стр. 26, 1932.

[2] В журнале «Социалистическая реконструкция и наука» № 3 за 1934 год, стр. 132.

[3] Акад. В. Ф. Миткевич. «Основные физические воззрения», стр. 148. 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, статья XVII.)

[4] Вопрос о значении дальнейших выводов В. А. Фока из соотношения неопределенности и принципа дополнительности («вновь открытые свойства материи») рассмотрен более подробно в статье VII настоящего сборника. (Примечание, добавленное в 1939 г.)

Я полагаю, что А. Ф. Иоффе без достаточных оснований причисляет Л. И. Мандельштама и Д. С. Рождественского к группе «Френкель, Тамм, Фок, Иоффе, Вавилов». Акад. Л. И. Мандельштам и акад. Д. С. Рождественский в высокой степени плодотворно работают каждый в своей области и дали много ценных результатов, как в области физической науки, так и в области ее практических приложений. С ними у меня нет расхождений такого порядка, как с А. Ф. Иоффе и с С. И. Вавиловым.

По поводу рассуждений А. Ф. Иоффе, клонящихся к доказательству того, что он материалист, я должен еще раз напомнить ему о его выступлении во время 'первой беседы о природе электрического тока (1929 г.). В этом выступлении он весьма пространно разъяснял, что в вопросе о природе тока можно рассуждать в зависимости от точки зрения, и для иллюстрации своей мысли он привел пример охотника и медведя. А. Ф. Иоффе сказал следующее (цитирую по стенограмме, помещенной в журнале «Электричество» № 3 за 1930 год):

«Позвольте сказать, как этот вопрос мне представляется, если так его поставить: что является сутью электрического тока? Я стою на точке зрения, прямо противоположной точке зрения В. Ф. Миткевича, и вот почему. Возьмем такой пример. Может быть, он покажется вульгарным, не относящимся к делу, но мне кажется, что он более или менее характерен. Я поймал медведя, и медведь меня не пускает; мой спутник скажет, что медведь поймал меня, а не я поймал медведя. У нас две различные точки зрения на одно и то же явление. Можно ответить на вопрос, кто правильнее описал это явление. Надо для этого посмотреть, что дальше будет. Если хорошо описаны все дальнейшие явления при помощи моей гипотезы, что я поймал медведя, — это очень хорошо. Если, наоборот, окажется, что я с медведем направился к нему в берлогу, — этим еще лучше объяснится,

что медведь меня поймал. С этой точки зрения, т.-е., что меня поймал медведь, можно объяснить, почему я не послушался моего спутника и не привел к нему медведя, а, наоборот, сам пошел к нему в берлогу; дело в том, что медведь меня держит, а не я его. Если мое тело несколько раздалось и вошли в него когти медведя,— это тоже будет хорошее описание, но опять-таки в данном случае не совсем все ясно. Здесь есть одна точка зрения для всех описанных явлений, мне более удобная, чем другая, хотя логически нельзя сказать, что когти вошли в мое тело, или мое тело (раздалось и когти вошли в него. Мы будем описывать всю эту совокупность явлений с одной точки зрения, а не с другой. Кто здесь медведь, а кто здесь человек? Мне кажется, что его зависит от того, как вы будете рассматривать».

Иными словами, говоря о природе физического явления, А. Ф. Иоффе не считает для себя обязательным проанализировать обстоятельства дела и выяснить, какие представления необходимо рассматривать как наиболее вероятные в отношении их соответствия действительной природе явления. Он говорит лишь о точке

195

зрения для него «более удобной». Я протестовал против подобного отношения к вопросу о природе физических явлений. Именно по поводу этой аргументации А. Ф. Иоффе я сказал: «...исследователь, изучающий физические явления, на какой бы принципиальной позиции он ни стоял, располагает, как физик, единственной возможностью: последовательно и без всяких отступлений проводить то положение, что предмет его изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания и что в действительности происходит не то или иное в зависимости от нашей точки зрения, а нечто совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно не подчиненное нашим точкам зрения»[1] (1933 г.).

Я полагаю, что вышеупомянутое суждение А. Ф. Иоффе, от которого он, насколько мне известно, еще не отказался, свидетельствует о том, что он стоит на позициях чисто кантианского идеализма, определяемого, по Ленину, так: «...человек дает законы природе, а не природа человеку».

Справедливость утверждения А. Ф. Иоффе о том, что он является материалистом, можно было бы признать лишь в том случае, если бы он четко и определенно отказался от ряда положений, которые он до сих пор защищает.

7. Ссылаясь на указание товарища Сталина по поводу того, что настоящая «наука... не признает фетишей», А. Ф. Иоффе не обратил внимания на продолжение этой цитаты. В действительности товарищ Сталин сказал следующее:

«Наука потому и называется наукой, что она же признает
фетишей, не боится поднять руку на отживающее, старое и
чутко прислушивается к голосу опыта, практики».[2]

Если бы А. Ф. Иоффе понял весь глубокий смысл слов товарища Сталина, то он не защищал бы идеалистических позиций В. А. Фока, Я. И. Френкеля и И. Е. Тамма, которые объективируют математические абстракции и создают из них фетиши. Он не умалчивал бы о ряде моих работ по изучению физических свойств магнитного потока, являющегося основным фактором во всех процессах, с которыми мы постоянно имеем дело в современной электротехнической практике: в электромагнитных генераторах тока (дииамомашинах постоянного и переменного тока) и в трансформаторах. Именно, чутко прислушиваясь «к голосу опыта, практики», мы должны признать объективную реальность магнитного потока и поэтому всесторонне изучать его. Именно в связи с этим и необходимо «поднять руку

---

[1] Акад. В. Ф. Миткевич. «Основные физические воззрения», стр. 20; см. также журнал «Электричество» № 8 за 1930 г. «Вторая беседа о природе электрического тока».

[2] И. В. Сталин. Речь на первом Всесоюзном совещании стахановцев.
Партиздат, 1935, стр. 22.

196

на отживающие, старое» утверждение о фиктивности магнитного потока, выявленного еще трудами Фарадея. Я и поднял руку. В этом моя вина, по мнению А. Ф. Иоффе и других моих идейных противников.

8. А. Ф. Иоффе упрекает меня и моих товарищей в «бесплодности».

Я, действительно, не могу гордиться такими «плодами» своей научной деятельности, какие есть у А. Ф. Иоффе и о которых он теперь предпочитает умалчивать, но я горжусь тем, что у меня нет таких «плодов», о которых я стремился бы не напоминать.

Если бы А. Ф. Иоффе стоял на материалистических позициях, он, несомненно, понял бы сущность нового учения о преобразованиях магнитного потока — учения, созданного мной за последние 10 лет и имеющего, по моему мнению, большое значение как в чисто теоретическом отношении, так и в отношении правильного освещения главнейших процессов, происходящих в динамомашинах постоянного и переменного тока и в трансформаторах.

Во всяком случае, о значимости трудов тех или иных ученых не могут судить беспристрастно ни они сами, ни их идейные противники. Это имеют право делать и должны сделать третьи лица.

Согласно утверждениям А. Ф. Иоффе, все, не разделяющие установок возглавляемой им и С. И. Вавиловым группы физиков, «бесплодны», «безграмотны», «отгородились от новых идей», «устранились от живой науки», «научно, отсталые» и т. п.

Это ли не есть высокомерие, которого не должно быть у советского ученого!

9. На данном этапе нашего спора по вопросам научно-философского характера я четко высказал и опубликовал все, что только мог. Акад. А. Ф. Иоффе, акад. С. И. Вавилов и их единомышленники все время уклоняются от внесения ясности в их принципиальные установки. Давно уже начав с ними дискуссию по важнейшему вопросу из области анализа наших физических представлений, я еще в 1933 г. во время своего доклада в Академии Наук СССР, тщетно призывал их к тому, чтобы они реагировали на мои выступления. Привожу дословно соответствующее место из своего доклада 4 октября 1933 г.:[1]

«Все мои принципиальные физические установки прямо или косвенно, явно или неявно вытекают из категорического отрицания допустимости «физического» действия на расстоянии. Должен признаться, однако, что в этом отношении у меня пока имеются, к сожалению, более или менее серьезные расхождения со многими моими коллегами по Академии Наук, в том числе, например, с академиками А. Ф. Иоффе, С. И. Вавиловым, с членами-корреспондентами Академии — Я. Н. Шпильрейном, Я. И. Френкелем, И. Е. Таммом и Г. А. Гамовым. Степень указанного расхождения варьирует в очень широких

[1] Акад. В. Ф. Миткевич: «Основные физические воззрения», стр. 52 — 53. 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, статья III.)

пределах, от некоторого лишь различия в четкости основных установок до полной противоположности».

«Едва ли мыслимы какие-либо возражения против того, что необходимо, наконец, подвергнуть тщательному обсуждению важнейший принципиальный вопрос о возможности «физического» действия на расстоянии. Я совершенно уверен, что наша совместная работа в Академии Наук предоставляет для этого все возможности, и, в частности, страницы «Известий» Академии открыты каждому из нас для изложения своего суждения по данному поводу. Путем обмена мнений мы придем, конечно, к объединяющим нас основным установкам. Мои попытки вызвать в стенах АН обмен мнений по этому вопросу были до сих пор безрезультатны».

С таким же призывом я обращался к своим идейным противникам и во время мартовской сессии Академия Наук в 1936 г., и так же безрезультатно.

А. Ф. Иоффе указывает в своей статье:

«Физическая группа Академии Наук наметила особую сессию, посвященную философии физики. Подготовка этой сессии, выбор дискуссионных тем и подбор докладчиков поручены особой

комиссии под председательством А. А. Максимова. К сожалению, все еще ничего не сделано, и сессию пришлось отложить на ноябрь».

Я считаю необходимым сделать по этому поводу небольшое разъяснение для А. Ф. Иоффе. Не физическая группа наметила организацию подобного рода дискуссионных собраний, а делается это во исполнение особого постановления президиума Академии Наук, к которому я, в конце концов, обратился письмом от 7 января 1937 года. Президиум Академии Наук чутко отнесся к моему предложению, и если бы это предложение встретило сочувственное отношение и со стороны руководства физической группы, то такие дискуссионные собрания удалось бы провести еще весной 1937 года. К сожалению, мне пришлось еще раз обратиться в президиум Академии Наук, и в заседании 15 июня текущего года, после моего доклада и обмена мнений по поводу создавшегося положения, [1] президиум постановил: 1. Отложить дискуссию по вопросам натурфилософии и по основным вопросам физики до осени 1937 года.

2. Предложить группам философии и физики АН СССР провести подготовку к этой дискуссии.

Просить основных участников дискуссии (в особенности академиков А. Ф. Иоффе и С. И. Вавилова) предварительно представить для опубликования в печати свои соображения по поднятым акад. Миткевичем философским вопросам физики.

3. Поручить организационной комиссии, под председательством А. А. Максимова, привлечь к участию в данной дискуссии возможно более широкий круг советских физиков и философов».

Сожаления А. Ф. Иоффе о необходимости откладывать созыв ди-

---

[1] Напомню, кстати, что именно президиум Академии Наук намечал на октябрь созыв дискуссионного собрания.

198

скуссионного собрания мне тем более непонятны, что именно он, а не кто другой задерживал выполнение п. 2 постановления президиума Академии Наук. Не сомневаюсь в том, что проведение в стенах Академии Наук указанных дискуссий, вызвать которые я стремился еще с 1933 г., будет сильно способствовать расцвету советской физической мысли на базе диалектического материализма! и в первую очередь поможет А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилову и всей возглавляемой ими группе физиков изжить свои неправильные научно-философские установки.

10. Я утверждаю, что в образовании наших основных физических представлений играет первенствующую роль общее суждение о том, как именно может осуществляться какое бы то ни было взаимодействие двух физических реальностей. Дело в том, что нет таких явлений природы, в которых не имело бы места взаимодействие хотя бы двух физических реальностей или их частей, принимающих участие в этих явлениях. И в нашем восприятии окружающего нас мира мы всегда встречаемся с тем или иным взаимодействием какой-либо внешней физической реальности с некоторым органом тела, от которого соответствующее возбуждение передается нашему мозгу через посредство нервной системы. Таким образом, во всех без исключения физических явлениях и при всяком восприятии этих явлений мы всегда и неизменно сталкиваемся, прежде всего, с взаимными связями между отдельными физическими реальностями, входящими в состав некоторой их совокупности, или с взаимными связями между отдельными частями одной и той же физической реальности. Вне этой общей обстановки мы не можем представить себе никакого физического процесса. Ясно, следовательно, что наши принципиальные взгляды касательно природы физических взаимодействий должны определенным образом влиять на характер наших рассуждений при рассмотрении всякого физического явления.

В связи со сказанным представляется в высокой степени целесообразным при анализе наших основных физических воззрений, прежде всего, остановиться на вопросе о вероятной природе физических взаимодействий. Это тем более необходимо, что принципиальные установки, касающиеся этого главного вопроса, предопределяют общий фон нашего физического мышления (материалистический или идеалистический).

Как известно, по рассматриваемому вопросу в науке существуют две точки зрения, взаимно исключающие одна другую: точка зрения действия на расстоянии и фарадее-максвелловская точка зрения, согласно которой все взаимодействия в природе совершаются не иначе, как при непременном участии процессов, происходящих в промежуточной среде. Антагонизму между этими двумя точками зрения я посвятил частично или полностью ряд моих выступлений. [1] При

[1] Акад. В. Ф. Миткевич. «Основные физические воззрения», стр. 11 — 14, 24—31, 42—53, 72—84, 86-89, 104—111, 115—117, 124, 134—137, 139—141, 143-149, 151—152, 153-162. 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, статьи I, II, III, VIII, IX, X, XI, XII, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX.)

199

этом я сформулировал вопрос, касающийся характера взаимодействия каких-либо двух физических центров. Этот вопрос, несколько разнообразя его построение, я систематически задавал с 1930 г. моим идейным противникам (А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилову, Я. И. Френкелю, И. Е. Тамму, В. А. Фоку и другим), которые до последнего времени так же систематически уклонялись от четкого ответа на него.

11. В условиях развертывающейся теперь на страницах «П. З. М.» дискуссий и в связи с утверждением А. Ф. Иоффе, что он является материалистом, я считаю полезным для большей ясности видоизменить свой основной вопрос следующим образом. Представим себе два магнита N_1S_1 и N_2S_2, находящиеся в пустоте на произвольном расстоянии один от другого и взаимодействующие друг с другом. Спрашивается: можно ли, придерживаясь материалистической точки зрения, утверждать, что два магнита N_1S_1 и N_2S_2 обладают способностью взаимодействовать друг с другом так, чтобы при этом в некотором замкнутом слое, со всех сторон окружающем магнит N_1S_1, не происходило какого бы то ни было физического процесса?

Я полагаю, что на этот вопрос должен быть дан категорический и четкий ответ: «нет».

Физики, до сих пор уклонявшиеся от четкого ответа на подобный вопрос, в том числе А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилов, Я. И. Френкель, И. Е. Тамм и В. А. Фок, тем самым обнаруживали их несогласие с моим ответом «нет».

В последних своих выступлениях на страницах «П. З. М.» А. Ф. Иоффе и С. И. Вавилов,[1] с одной стороны, как будто бы выражают отрицательное отношение к идее действия на расстоянии, но, с другой стороны, они возражают против формулировки моего вопроса и считают, что этот вопрос не допускает простых ответов «да» или «нет», и потому уклоняются от подобных четких ответов. Однако ни А. Ф. Иоффе, ни С. И. Вавилов не указывают, как же именно было бы целесообразно сформулировать вопрос, чтобы он наилучшим образом выявлял антагонизм между двумя противоположными точками зрения: материалистический и идеалистический. С. И. Вавилов напоминает мне о единстве противоположностей. А. Ф. Иоффе отклоняется в сторону от вопроса, полемизируя по поводу идеи о среде, заполняющей все физическое пространство. При этом он упускает из виду, что тот или иной ответ на мой вопрос сам по себе вовсе не связывает нас в отношении признания промежуточной среды. Необходимо ли допустить существование такой среды, называть ли ее по-старому эфиром или как-либо иначе, — это особый вопрос, которым, по моему мнению, следует заняться только после решения основного вопроса об общих условиях всякого физического взаимодействия. Итак, ни А. Ф. Иоффе, ни С. И. Вавилов не дали четкого ответа на мой главный вопрос.

[1] См. статью С. И. Вавилова в № 7 «П. З. М.» за 1937 год.

200

По этому поводу еще в 1933 г. в своем докладе в Академии Наук на тему «О «физическом» действии на расстоянии» я указал следующее:

«Всякое уклонение от прямого ответа на поставленный мною вопрос, всякие оговорки или имеющие характер таковых оговорок рассуждения клонятся обычно к оправданию ответа «да». [1]

Возражая против самой постановки вопроса, мои противники давно уже указывали на ее ошибочность. Учитывая эти возражения, я в упомянутом докладе 1933 г. доказал, что сформулированный мной вопрос является вполне законным. Доказательство это сводится к следующему чрезвычайно простому рассуждению.

Как бы мы ни смотрели на сущность происходящих в природе процессов, все мы принимаем за нечто безусловно достоверное тот факт, что магниты N_1S_1 и N_2S_2 могут как-то физически взаимодействовать. Нельзя, далее, представить себе какие-либо доводы против утверждения, что в слое, со всех сторон окружающем магнит N_1S_1 либо может, вообще говоря, происходить какой бы то ни было физический процесс, либо он может совершенно отсутствовать. Что-либо третье, кроме этих двух возможностей, не мыслимо. В связи с этим мы имеем полное право сопоставлять факт взаимодействия магнитов N_1S_1 и N_2S_2 с вероятностью наличия или с вероятностью отсутствия какого бы то ни было физического процесса в слое, окружающем магнит N_1S_1, и иметь по этому поводу суждение. Таким образом, сформулированный мной вопрос, побуждающий нас взвесить вероятность того или другого, необходимо признать вполне допустимым, правильным и законным.

Не подлежит никакому сомнению, что всякий исследователь, стремящийся вникнуть в сущность физических явлений, и может и должен дать на вышеуказанный вопрос о взаимодействии магнитов вполне определенный ответ: «да» или «нет». Совершенно невозможно допустить мыслимость некоторого третьего ответа. Не может быть также и речи о каком-либо синтезе этих принципиально противоположных и исключающих друг друга ответов «да» и «нет», так как нельзя представить себе построение такой физической теории, согласно которой в слое, со всех сторон окружающем магнит N_1S_1, в одно и то же время и происходил бы некоторый физический процесс и решительно ничего не происходило бы.

По моему мнению, уклоняющиеся от четкого ответа на данный вопрос мои противники должны были бы, по крайней мере, опровергнуть мое доказательство законности и правильности вопроса. Однако и от этого они уклоняются, а вместо этого стремятся всячески дискредитировать мой вопрос. Между прочим, во время мартовской сессии Академии Наук в 1936 г. вместо уклонившегося от ответа на мой вопрос акад. А. Ф. Иоффе выступил И. Е. Тамм, который пытался высмеять этот вопрос и заявил, что в нем не больше смысла,

---

[1] Акад. В. Ф. Миткевич. «Основные физические воззрения», стр. 46. 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, статья III.)

чем в вопросе о цвете меридиана.[1] Я признал некоторую долю истины в сравнении, сделанном И. Е. Таммом, и разъяснил, что я действительно обращаюсь к своим идейным противникам с вопросом о «цвете» их меридиана. [2] Акад. С. И. Вавилов в заседании Совета отделения математических и естественных наук Академии Наук 16 апреля 1937 г., оспаривая значение настойчиво повторяемого мной вопроса, спрашивал меня: «Что же, вы считаете его лакмусовой бумажкой?» Приношу глубокую признательность И. Е. Тамму и акад. С. И. Вавилову за то, что своими остроумными высказываниями они заострили мой вопрос. Без их весьма существенной помощи мне самому это не пришло бы в голову. Да, я теперь ясно вижу, что сформулированный мной вопрос о природе физических взаимодействий по своему существу является своего рода «лакмусовой бумажкой» для определения «цвета» нашего меридиана, т.-е. нашей основной установки (материалистической или идеалистической).

Я утверждаю, что наступил такой момент в нашем длительном споре, когда А. Ф. Иоффе, С. И. Вавилов, Я. И. Френкель, И. Е. Тамм и В. А. Фок должны, наконец, либо дать четкий ответ («да» или «нет») на поставленный мной вопрос о взаимодействии магнитов, либо четко опровергнуть мое доказательство правильности постановки данного вопроса. Только после получения ответов от всех упомянутых лиц будет продуктивным дальнейший анализ наших основных физических воззрений с точки зрения их соответствия установкам диалектического материализма.

12. Итак, можно следующим образом резюмировать все, сказанное выше:

а) Выступление А. Ф. Иоффе и по форме и по содержанию лишний раз подтверждает, что положение на философском фронте советской физики действительно весьма неблагополучно.
б) А. Ф. Иоффе и примыкающая к нему группа физиков систематически уклонялись от обсуждения принципиальных научно-философских установок, господствующих в современном физическом мышлении.
в) Вместо того чтобы стремиться общими силами поставить советскую физическую мысль на правильный путь, группа А. Ф. Иоффе и С. И. Вавилова до сих пор пытается дискредитировать все начинания в этом направлении.
13. Наш спор в настоящее время приобрел особую остроту. Мои идейные противники не проявляют той уравновешенности и того спокойствия, которые столь полезны при ведении всякой дискуссии, а в особенности дискуссии научно-философской. Но я полагаю, что

---

[1] Так как ни А. Ф. Иоффе, ни С. И. Вавилов, оба уклонившиеся от ответа на обращенный к ним вопрос, в своем заключительном слове не сочли необходимым реагировать на заявление И. Е. Тамма, то я считаю, что они в полной мере одобряют сравнение моего вопроса с вопросом о цвете меридиана.
[2] Акад. В. Ф. Миткевич. «Основные физические воззрения», стр. 162, 1936. 2-е изд. (См. настоящий сборник, стр. 185, 186.)
202
пройдет еще немного времени и А. Ф. Иоффе, С.И. Вавилов и примыкающие к ним другие наши физики осознают свои расхождения
с установками диалектического материализма и исправят свои ошибки,
после чего их дальнейшая деятельность станет значительно плодотворнее и мы все, несколько более понимая друг друга, чем это было до сих пор, будем упорно работать на пользу истинно советской физической науки.