

А. Д. Власов  
Б. П. Мурин

**Единицы  
физических  
величин  
в науке  
и технике**

**СПРАВОЧНИК**



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1990

ББК 22.3  
В58  
УДК 53.081 (035.5)

Рецензенты П. Н. Селиванов, Н. А. Ерюхина  
Научный редактор Б. М. Тареев

**Власов А. Д., Мурин Б. П.**

**В58** Единицы физических величин в науке и технике: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.: ил.

**ISBN 5-283-03966-8**

Основное место отведено Международной системе единиц (СИ) и гауссовой системе. Кратко описаны системы и единицы, применявшиеся в прошлом, и история их развития от мер Древнего Египта и Вавилона до старых русских мер и весов. Показано внутреннее единство многочисленных систем электрических и магнитных единиц. Книга содержит необходимые справочные таблицы. Приведена уточненная таблица фундаментальных физических постоянных, согласованная с новым определением метра.

Для широкого круга специалистов и научно-технических работников, а также аспирантов и студентов физических и технических специальностей.

**В** 2004010000-296 36-90  
051(01)-90

**ББК 22.3**

Справочное издание

**Власов Александр Данилович  
Мурин Борис Павлович**

**ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН  
В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

**Заведующий редакцией С. К. Брешин  
Редактор Н. Е. Никитина  
Художник обложки А. С. Александров  
Художественный редактор А. Л. Вульфсон  
Технический редактор В. В. Хапаева  
Корректор З. Б. Драновская  
ИБ № 2650**

Сдано в набор 13.02.90. Подписано в печать 09.07.90. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 9,24, Усл. кр.-отт. 9,45. Уч.-изд. л. 12,06. Тираж 81 000 экз.  
Заказ № 500. Цена 60 к.

Энергоатомиздат, 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10  
Владимирская типография Госкомпечати СССР  
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

**ISBN 5-283-03966-8**

© Авторы, 1990

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Важнейшими событиями в метрологии последних десятилетий стали принятие Международной системы единиц (СИ) в 1960 г., а затем введение ее в СССР с 1982 г. Вслед за этим был разработан ряд более детальных стандартов и руководящих документов.

Однако развитие метрологии продолжается, и утверждаемые документы спустя некоторое время уже требуют поправок и дополнений. Так, XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла в 1983 г. принципиально новое определение метра. На основе принятых значений метра и других основных единиц СИ, используя специальную методику, удалось внести заметные поправки в периодически обновляемую (раз в 8—10 лет) таблицу фундаментальных физических констант. В последнем издании таблицы КОДАТА (1986 г.) точность повышена в среднем на порядок. Даже ряд обозначений физических величин, предписываемых стандартом, оказался не вполне удачным, и в литературе отходят от этих обозначений.

Но не только названные важные решения и изменения отражены в предлагаемой книге. Существуют давно известные проблемы построения систем единиц, до сих пор не получившие исчерпывающего решения. Эти проблемы также заслуживают внимания.

Наряду с Международной системой единиц в различных разделах физических наук применяется система единиц СГС (гауссова система). Нередко высказывается мнение, что СИ плохо приспособлена для описания электромагнитных явлений и в этом отношении сильно уступает системе СГС, обладающей предельной физической истинностью. Вопрос о сравнительных качествах СИ и гауссовой системы неоднократно был предметом серьезных дискуссий.

Сторонники Международной системы сумели показать, что она и в области электромагнетизма отличается логичностью и последовательностью построения. Однако структура гауссовой системы еще не подвергалась достаточно внимательному анализу. В данной книге сделана попытка хотя бы частично восполнить этот пробел.

В чем причина появления дробных показателей размерности в СГС, физически мало наглядных и практически весьма неудобных? Почему в гауссовой системе различные физические величины так часто имеют одинаковые размерности? Не существует ли какой-либо внутренней связи между размерностями, внешне столь различными в разных системах единиц? Действительно ли в системе СГС лишь три основные единицы? И, наконец, насколько она логично построена и физически ясна? Чтобы ответить на эти вопросы, пришлось рассмотреть целое семейство давно не употребляемых систем единиц, в свое время давших жизнь гауссовой системе.

Помимо описания единиц физических величин и их систем кни-

га снабжена необходимыми справочными таблицами. Представлялось целесообразным более подробно, чем обычно, осветить связанные с Международной системой вопросы рационализации уравнений. Книга содержит исторический обзор, свидетельствующий о настоятельной потребности в единой системе единиц физических величин.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность А. Г. Чертову за ряд советов и В. П. Машковичу за указания, касающиеся единиц ионизирующих излучений, а также П. Н. Селиванову и Н. А. Ерюхиной за сделанные ими ценные замечания. Особенно признательны авторы Б. М. Тарееву за внимательное прочтение рукописи,

*Авторы*

## ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## I. ДРЕВНИЕ МЕРЫ

История единиц физических величин начинается с истории мер и весов.

Самые ранние из дошедших до нас сведений о древних мерах относятся к тому времени, когда уже развились скотоводство и земледелие, возникла письменность, образовались сравнительно большие государства.

За три тысячи лет до н. э. в Египте уже применялись довольно точно установленные и узаконенные единицы длины, площади и веса. Строительство ирригационных систем, возведение храмов и дворцов, сооружение гигантских пирамид было бы невозможно без измерений.

Почти за две тысячи лет до н. э. в древней Передней Азии получила широкое распространение шумеро-вавилонская система мер и весов. В Греции, начиная с VI в. до н. э., и несколько позднее в Риме, при сооружении храмов и строительстве дорог и водопроводов также использовались сравнительно точно установленные единицы длины и веса.

Русские летописи и другие источники содержат довольно подробные сведения о мерах и весах, имевших хождение на Руси с XI по XVII в. Наконец, имеется много данных о мусульманских мерах и весах, применявшихся с VIII в. до наших дней.

Обращают на себя внимание частые совпадения единиц длины, которые устанавливались у разных народов, по-видимому, независимо. Это, впрочем, не должно удивлять: при выборе этих единиц пользовались во многих случаях одним и тем же источником — размерами человеческого тела.

Так, начиная с Древнего Египта и кончая Россией, применяли единицу под названием локоть. В Египте различали малый локоть и царский локоть. Почти везде использовались в качестве единиц длины ширина большого пальца и длина ступни. Эти единицы удержались вплоть до XX в., например, в Англии под названиями дюйм и фут, в мусульманских странах — под названиями ангушт (асба) и пай (единица пай сохранилась только в детских играх).

Английская единица палм равна ширине ладони, а единица под названием ярд определена как расстояние от кончика носа до конца указательного пальца вытянутой руки одного из английских королей. В Древнем Риме применялась миля, которую отсчитывали как тысячу двойных шагов.

Характерна единица длины, носившая название сажень. В России кроме простой сажени, равной трем локтям, применялась косая сажень — расстояние от подошвы левой ноги до конца пальцев поднятой вверх правой руки. Была и маховая сажень, равная расстоянию между концами пальцев вытянутых рук. Такая же сажень применялась и в Средней Азии под названием кулач. В ряде арабских стран использовались сажени размером около 2 м (ба, кама) и около 4 м (касаба, наб). Ныне в Египте ба равна примерно 3 м.

Большие расстояния измерялись порой в весьма своеобразных единицах. Так, среди древнерусских мер было поприще — расстояние, пробегаемое лошастью от отдыха до отдыха. В Германии некогда

измеряли расстояния по количеству трубок, выкуриваемых пешеходом на протяжении его пути. На Кубе единицей длины одно время служил петушиный крик — расстояние, на котором еще слышно пение петуха.

В мусульманских странах для измерения больших расстояний применяется фарсах (парасанг), состоящий из трех миль по 1000 сажений (ба), т. е. равный приблизительно 6 км, и барид, равный 4 фарсахам, т. е. 24 км.

Для измерения малых длин применялись такие причудливые единицы, как, например, толщина волоса с морды осла (Египет) или из гривы рабочей лошади (мусульманские страны), толщина лииии (Вавилония, современная Англия) и диаметр точки (Англия).

Кратные и дольные единицы образовывали первоначально посредством очень небольших множителей и делителей. Наиболее часто для этой цели использовали числа 2, 3 и 4, что видно по вавилонским мерам вместимости, по некоторым русским мерам и даже по английским мерам, дожившим до наших дней (табл. П19, П20). При малых отношениях между единицами, казалось, проще вести расчеты. Но не исключено, что тяга к малым кратностям сохранилась от далекого прошлого, когда люди еще не знали больших чисел.

В дальнейшем кратные единицы стали образовывать и с помощью больших множителей. Появились такие множители, как 20 и даже 27 или 28. Но все чаще использовались число 12 и кратные ему числа 24 и 60, удобные для деления на части. По-видимому, именно в это время проявилась тенденция использовать двенадцатеричную систему исчисления. Эта тенденция подкреплялась и тем, что в году около 12 лунных месяцев.

В третьем тысячелетии до н. э. шумеры создали шестидесятиричную систему исчисления. На ее основе позже возникла шумеро-вавилонская система мер и весов. В частности, в Вавилонии разделили час на 60 минут и минуту — на 60 секунд. Аналогично был разделен и угловой градус.

Впоследствии возобладала десятичная система исчисления. Кратные единицы стали образовываться посредством целых степеней числа 10. Но деление суток на часы, минуты и секунды осталось в неприкосновенности. Это деление, плохо совместимое с десятичной системой исчисления, нарушает стройность современных систем единиц.

Особенностью древних мер является также частое совпадение единиц веса с денежными единицами. Чеканка монет возникла не сразу и была в те времена довольно сложным делом. Золото и серебро просто взвешивались, и их порции измерялись в единицах веса. Вавилонская единица веса — талант — до сих пор упоминается как ценность, которую не следует зарывать в землю. Все мусульманские меры веса основаны на двух единицах — дирхаме, восходящем к греческой драхме, и мискале, или динаре. Классический золотой динар весил 4,235 г, а дирхам — 2,82 г\*. В отличие от этих монетных весов, мискаль и дирхам как чисто товарные веса были несколько больше, и их размер колебался. Связь весовых и денежных единиц сохранилась вплоть до XX в. Английская денежная единица носит название

---

\* В этой главе древние и старые единицы веса для наглядности выражены в соответствующих единицах массы (г, кг).

фунт стерлингов, а единица веса карат, равный 0,2 г, применяется исключительно при взвешивании драгоценных камней и жемчуга.

Наконец, необходимо отметить еще одно немаловажное обстоятельство. Начиная с глубокой древности, происходило образование сложных производных единиц на основе более простых. За несколько тысяч лет до н. э. в Египте применяли единицу площади под названием арура, определенную как площадь квадрата со стороной, равной 100 царским локтям. Там же использовалась единица объема (вместимости) хотен — половина объема куба со стороной в один царский локоть. Мусульманские единицы площади ашир и джариб (джериб) были равны соответственно одной и 100 квадратным касабам, т. е. около 16 и 1600 м<sup>2</sup> (но были джарибы и другого размера). Русская десятина была квадратом со стороной в 50 сажений, а позднее — прямоугольником установлеинного размера.

Участки земли в мусульманских странах измерялись также весьма необычными единицами — по весу или объему пшеницы, необходимой, чтобы их засеять. Так, в Средней Азии употреблялась единица площади харвар — площадь земли, для засева которой необходимы семена весом в один харвар. Единица веса харвар («ослиный вьюк») в разное время и в разных странах составляла от 100 до 300 кг.

Уже в древности возникли такие простейшие понятия механики, как скорость, удельный вес, давление, момент силы. Очевидно, механические величины так или иначе оценивались по размеру, а следовательно, фактически устанавливались и применялись единицы этих механических величин.

## 2. ПРОБЛЕМА УНИФИКАЦИИ И УЗАКОНЕНИЯ

Вместе с возникновением сравнительно больших государств появилась проблема упорядочения и узаконения мер и весов. Без единой системы мер были бы невозможны ни грандиозные строительные работы, ни повседневное ведение хозяйства. Унификации и стабильности мер требовали интересы торговли. Проблема унификации мер, возникнув в древности, в дальнейшем никогда уже не сходила со сцены. Приближаясь в отдельные периоды к своему разрешению, эта проблема затем в силу ряда факторов вновь становилась весьма актуальной. Не разрешена она полностью и в наши дни.

В древнем Египте за три тысячелетия до н. э., в эпоху строительства пирамид, мерой длины был уже упоминавшийся царский локоть. Само название этой единицы свидетельствует, что она была официально узаконенной. Меры, установленные законом, применялись и в Вавилоне.

В Греции в период деятельности Солона (VI в. до н. э.) в качестве единицы длины был узаконен фут, равный примерно 0,3 м. Но узаконенные меры не были обязательными, наряду с ними применялись и другие.

В средние века в ряде европейских стран предпринимались попытки введения мер, одинаковых и обязательных в пределах данной страны. Однако эти первые попытки, имевшие место в Англии в 1001 и 1215 гг., во Франции в 1321 г. и в Австрии в 1438 г., оказались безуспешными.

Разнобой и хаос в области мер и весов осложнял торговлю в пределах отдельно взятых стран и тем более международную торговлю. Так, в XV в. в Австрии почти в каждом городе были свои

меры, а иногда свои меры были и на разных базарах в пределах одного города. В Германии, еще и в начале XIX столетия представлявшей конгломерат из множества отдельных независимых государств — королевств, княжеств и герцогств, часто карликовых, царил хаос в мерах и весах, как, впрочем, и в денежных системах. Например, фут в разных частях Германии имел размеры от 0,25 до 0,33 м, фунт изменялся от 0,46 до 0,51 кг и т. д.

Потребность в установлении узаконенных мер была настолько настоятельной, что они вводились постепенно в одной стране за другой, и в первую очередь в наиболее развитых странах.

В Англии узаконенные меры впервые появились в 1494 г. В XVII в. были установлены английские меры длины и веса, без каких-либо изменений действовавшие вплоть до последнего времени (табл. П20).

Во Франции в 1735 г. была установлена единица длины туаз и изготовлен ее эталон.

В России до конца XVI в. основной единицей был локоть (около 0,46 м), а позднее, вплоть до XVIII в., — аршин, равный полутора локтям, или 27 английским дюймам (0,686 м). Сажень до XVII в. равнялась трем локтям, а в 1649 г. была установлена сажень, равная трем аршинам. Размер версты также был разным в разное время. В писцовом наказе 1554 г. названа верста в 500 саженей царских, а уложение 1649 г. установило версту в 1000 саженей трехаршинных.

До XVIII в. в России наряду с десятиной применялись и единицы площади, изменяющиеся в зависимости от качества земли. Так, единица площади под названием выть равнялась шести десятинам хорошей земли, или семи десятинам средней, или восьми десятинам плохой земли. Аналогично изменялась и единица площади, носившая название соха.

Мерами сыпучих тел были кадь и кова, которая равнялась двум четверткам, четырем четвертям, восьми осьминам или мерам и тридцати двум четвертям. Объемы жидкостей измерялись такими мерами, как бочка, ведро, штоф и др. Эти меры, однако, не были узаконены, и размеры их не были везде одинаковыми.

Русскими мерами веса в X—XVI вв. были берковец, пуд, большая гривенка и золотник. Позднее большую гривенку стали называть ансырь, а в XVII в. — фунт.

В XVIII в. в России были установлены и узаконены как обязательные несколько измененные меры и веса, применявшиеся затем вплоть до Великой Октябрьской революции. Они приведены в табл. П19.

### 3. МЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕР. КОНТРОЛЬ

Неуклонно возрастающая необходимость в унификации единиц физических величин не только в пределах отдельных стран, но и в международном масштабе привела в конце XVIII в. к созданию, а в XIX в. и к международному признанию метрической системы мер.

Метрическая система была разработана и первоначально введена в ходе Великой французской революции. В 1789 г. в Национальное собрание Франции был внесен правительственный проект об установлении единых для всей страны мер. Была создана под председательством Лапласа специальная комиссия в составе Лагранжа, Борда, Монжа и др. Исходя из идеи использования естест-



венных и стабильных эталонов длины и веса, комиссия по предложению Лапласа приняла в качестве единицы длины одну десяти-миллионную часть четверти длины Парижского меридиана. Этой единице было присвоено название метр — от греческого слова *μετρον*, что означает мера (впервые название метр ввел в 1675 г. Буратини в книге «Универсальная мера»). За единицу веса был принят вес одного кубического сантиметра чистой воды при 4 °С — температуре ее наибольшей плотности. Эту единицу называли граммом. В качестве единицы времени приняли секунду, определенную как 1/86400 часть средних солнечных суток. Чрезвычайно плодотворным оказалось предложение Ван-Свиндена образовывать десятичные кратные и дольные единицы посредством приставок кило, гекто, дека, деци, санти, милли.

Проект Метрической системы был утвержден Национальным собранием Франции 30 марта 1791 г. Не дожидаясь окончания измерений Парижского меридиана, французское правительство 7 апреля 1795 г. объявило о введении десятичной системы мер с основными единицами — метром и граммом. По завершении измерений меридиана Национальному собранию были представлены платиновые эталоны метра и килограмма, изготовленные механиком Леууаром. Эти эталоны были утверждены декретом Национального собрания от 10 декабря 1799 г. и затем переданы на хранение в Национальный архив Франции, почему впоследствии и получили название «архивных» метра и килограмма. Когда выяснилась необходимость в единице массы, за нее приняли массу того же эталона килограмма.

Метрические меры, по мысли их создателей, были предназначены «на все времена, для всех народов». Но даже во Франции после реставрации монархии метрическая система была предана забвению и стала обязательной лишь в 1840 г. Но тем не менее она медленно, но верно завоевывала признание. Не последнюю роль в распространении метрических мер сыграли русские ученые. Д. И. Менделеев на первом съезде русских естествоиспытателей в 1867 г. говорил о необходимости «склонить народы к единству мер, весов». На Парижской выставке в 1867 г. под председательством петербургского академика Б. С. Якоби был образован Международный комитет весов, мер и монет. По предложению Петербургской и Парижской Академий наук для изучения метрической системы была организована международная метрическая комиссия, которая созывалась в 1870 и 1872 гг.

20 мая 1875 г. семнадцать государств, в том числе и Россия, подписали метрическую конвенцию, имеющую целью содействовать международному единству мер. Тогда же было организовано Международное бюро мер и весов, подчиненное Международному комитету. В задачу бюро, в частности, входило изготовление копий с прототипов метра и килограмма. За 10 лет было со всей тщательностью изготовлено 30 эталонов метра.

На I Генеральной конференции мер и весов в 1889 г. созданные эталоны были разделены по жребию между государствами, подписавшими конвенцию. Россия получила два эталона метра: № 11 и 28.

4 июля 1899 г. в России был принят закон, разрешающий применять метрическую систему «наравне с основными российскими мерами». Но только после Октябрьской революции по указанию В. И. Ленина управляющий Главной палатой мер и весов проф. Н. Е. Егоров подготовил проект декрета о переходе на метрическую систему. Декрет был утвержден В. И. Лениным 14 сентября 1918 г.

Переход на метрическую систему был официально завершён к 1927 г. Но ещё долго имели хождение фунты и пуды, долго расстояния выражали в верстах, и лишь постепенно они уходили в прошлое, окончательно уступая место килограммам и километрам. Впрочем, метры, сантиметры и литры стали применяться почти сразу после официального введения.

Введённая в последней четверти XIX в. почти повсеместно в Европе, метрическая система в настоящее время принята подавляющим большинством стран мира. Исключение долго составляли из крупных государств лишь США, Англия, Индия и Канада. Но и они приняли законодательные акты о переходе на метрическую систему.

Переход к новым мерам затруднен, разумеется, не только из-за человеческой склонности к привычному. Необходимо изготовить большое количество новых гирь, мерных линеек и т. п. Но ещё затруднительнее перейти в промышленности от дюймовых к миллиметровым стандартам на чертежи и детали машин, вплоть до стандартов на размеры болтов и гаек.

Нередко встречаются утверждения о том, что метрическая система мер и весов не представляет системы единиц в современном понимании. Но ведь на основе трех единиц метрической системы — метра, грамма и секунды — было образовано не только множество кратных и дольных, но и много производных единиц. Были образованы единицы площади и объема, скорости и ускорения, давления и силы, энергии и мощности. Правда, в рамках метрической системы образование производных единиц физических величин ограничивалось лишь областью геометрии и механики и притом не имело должного научного обоснования.

Вместе с унификацией и узаконением мер и весов возникла задача контроля за правильностью их применения. Вначале функции контроля возлагались на те или иные уже существующие органы власти или другие подходящие инстанции. Но со временем в разных странах стали организовывать специальные учреждения и органы, призванные наблюдать за правильностью применения установленных мер и весов. Функции этих специальных учреждений постепенно расширялись и усложнялись.

Опишем вкратце этот процесс на примере России.

Уже на рубеже X и XI вв. великий князь Владимир издал указ, возлагавший на священников обязанность хранить верные меры и веса (гири) и наблюдать за взвешиваниями и измерениями. За это взималась плата в пользу церкви.

С XII в. в России надзор за торговым инвентарем поручается особым управам, а также посадникам и позднее — приказам.

В указе 1556 г. упоминается об изготовлении и клеймении гирь и различных мер и о хранении их в таможнях. Но долгое время не было узаконенных образцов, по которым можно было бы поверять рабочие меры. Не было и систематического контроля над рабочими мерами. Под одним и тем же названием имели хождение меры и веса разного размера.

Петр I возложил обязанности контроля за правильностью мер и весов на Департамент торговли и мануфактур Министерства финансов, причем непосредственные функции контроля должны были осуществлять чины полиции.

Затем был образован Комитет по разработке способов контроля и поверки торговых мер и весов. По заданию Комитета петербургский Монетный двор в 1747 г. изготовил бронзовую золоченую меру

веса в один фунт. Однако гири по-прежнему изготовлялись и клеймились казенными чугунолитейными заводами без должного контроля.

Лишь в XIX в. в России создаются специальные учреждения по систематическому контролю за мерами и весами. В 1832 г. учреждается Комиссия для приведения мер и весов к единообразию, в 1842 г. создается Депо образцовых мер и весов, в 1893 г. оно преобразуется в Главную палату мер и весов. В Депо образцовых мер и весов первым ученым-хранителем (с 1842 по 1865 г.) был академик А. Я. Купфер, после него (с 1865 по 1892 г.) — профессор В. С. Глухов и с 1892 г. — Д. И. Менделеев. Он же стал первым управляющим Главной палаты мер и весов.

Одной из функций упомянутой Комиссии, а затем Депо и Главной палаты мер и весов было руководство изготовлением эталонов. В 1833 г. по поручению Комиссии английский метролог Кэтер изготовил прототип сажени, а также образцы фута и ярда. По прототипу сажени механик Академии наук Гиргенсон изготовил из латуни и платины другой прототип, узаконенный в 1835 г. в качестве «главной государственной образцовой сажени». В 1833 г. был изготовлен также платиновый прототип фунта, равного образцовому фунту 1747 г.

При Д. И. Менделееве деятельность Главной палаты мер и весов была значительно расширена и распространена на поверку и контроль манометров, водомеров, газометров, электрических счетчиков и т. п. В 1894 г. был изготовлен платиноиридиевый прототип русского фунта, а в 1899 г. он был узаконен. Было узаконено также его соотношение с килограммом:  $1 \text{ русский фунт} = (0,40951241 \pm \pm 0,00000001) \text{ кг}$ .

После Октябрьской революции Главная палата мер и весов в результате ряда реорганизаций была преобразована во Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии. В 1945 г. ему присвоено имя Д. И. Менделеева. Институт метрологии им. Д. И. Менделеева вместе с другими метрологическими институтами и их филиалами обеспечивает научную сторону метрологической службы в СССР. Решение практических задач метрологии возложено на республиканские и областные лаборатории. Государственную метрологическую службу в целом возглавляет Государственный комитет СССР по стандартам. Кроме того, имеется ведомственная метрологическая служба.

#### 4. ПЕРВЫЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ. ПРОБЛЕМА ЭТАЛОНОВ

На основе единиц длины и времени еще в древности образовывали и единицы других величин — площади, объема, скорости. С появлением метрической системы стали образовывать единицы и других геометрических и механических величин. Кроме того, был найден удачный метод образования кратных и дольных единиц. Однако развитие науки и техники в XIX в. требовало измерений и в ряде вновь возникающих областей физики.

В 1832 г. К. Гаусс сформулировал научные основы построения систем единиц. Гаусс выбрал в качестве основных единицы длины, массы и времени, а конкретно — миллиметр, миллиграмм и секунду. На основе трех указанных единиц, приняв за исходное уравнение закон Кулона для магнитных масс, Гаусс образовал единицы магнитных величин.

Систему магнитных единиц, построенную Гауссом, в 1851 г. Вебер дополнил электрическими единицами. За системами, основанными подобно системе Гаусса — Вебера на единицах длины, массы и времени, на длительное время утвердилось название абсолютных.

Изучение электрических и магнитных явлений, и в частности создание электромагнита, уже в первой половине XIX в. привело к практическим приложениям рождающейся электротехники, из которых наиболее значительным был электромагнитный телеграф. Появилась настоятельная необходимость в установлении удобных и общепризнанных единиц электрических и магнитных величин.

В 1861 г. Британская ассоциация для развития наук по предложению У. Томсона создала особый Комитет по эталонам электрического сопротивления. Помимо Томсона в него вошли Уитстон, Максвелл, Сименс, Джоуль и другие физики того времени. Комитет не ограничился первоначально поставленной задачей, и его стали называть вскоре Комитетом по электрическим эталонам. Но в действительности был охвачен гораздо более широкий круг вопросов.

Оценив достоинства метода построения системы единиц, созданного Гауссом, вместо предложенных им сравнительно мелких единиц Комитет счел более целесообразным принять в качестве основных единиц сантиметр, грамм и секунду. Так появилась система единиц СГС. Образование единиц механики не встретило каких-либо затруднений. Единице силы в системе СГС было присвоено название дин, единице работы — эрг.

При образовании единиц электромагнетизма на основе трех единиц — сантиметра, грамма и секунды — можно построить не одну, а две одинаково логичные и стройные системы единиц: электромагнитную систему СГСМ и электростатическую систему СГСЭ. Первая получается, если исходить из закона Кулона для магнитных масс. Ко второй же приходят, взяв в качестве исходного закон Кулона для электрических зарядов. Комитет рекомендовал для практического применения систему СГСМ.

Поскольку единица электрического сопротивления в системе СГСМ оказалась слишком малой, Комитет принял в качестве практической единицы сопротивление в  $10^9$  раз большее. Был изготовлен вещественный образец этой единицы сопротивления из сплава двух частей серебра и одной части платины, насколько возможно близкий к  $10^9$  ед. СГСМ. Он получил название единицы Британской ассоциации (BAU). Комитет разослал большое число платиносеребряных копий этого эталона различным научным учреждениям.

Комитет предложил не только практическую единицу сопротивления, но и целую систему практических электрических единиц, базирующихся на единицах СГСМ, которым были даны наименования, связанные с именами ученых:

омада — единица электрического сопротивления, равная  $10^9$  ед. СГСМ (впоследствии переименована в ом),

вольт — единица электродвижущей силы, равная  $10^8$  ед. СГСМ,

фарада — единица электрической емкости, равная  $10^{-9}$  ед. СГСМ. Отсюда вытекают и размеры практических единиц силы электрического тока (0,1 ед. СГСМ) и электрического заряда (0,1 ед. СГСМ).

Свою работу Комитет по электрическим эталонам закончил в 1870 г. Опубликование результатов его работы вызвало значительный интерес во всем мире среди тех, кто так или иначе был связан с изучением или применением электромагнетизма. К тому времени

существовало около пятнадцати различных единиц сопротивления, восемь разных единиц напряжения и электродвижущей силы (ЭДС), пять единиц силы тока. Рекомендации Комитета позволили устранить трудности, порожденные разнообразием электрических и магнитных единиц.

В 1881 г. в Париже в связи с Международной выставкой по электричеству состоялся Первый Международный конгресс электриков. В конгрессе приняли участие У. Томсон, Гельмгольц, Кольрауш, от России — А. Г. Столетов.

На парижской выставке демонстрировались лампы накаливания, электрическая вольтова дуга, телефон, динамомашины. Ввиду широкого распространения электротехнических устройств необходимость в единой системе единиц электромагнетизма была совершенно очевидной.

Первый международный конгресс электриков одобрил и принял обе системы единиц, разработанные Комитетом Британской ассоциации, — электростатическую систему СГСЭ и электромагнитную систему СГСМ. Кроме того, в соответствии с предложением Комитета для практических нужд Первый международный конгресс электриков официально принял абсолютную практическую систему единиц, базирующуюся на системе СГСМ.

Ом и вольт, единицы электрического сопротивления и напряжения в практической системе, сохранили свои определения как  $10^9$  и  $10^8$  ед. СГСМ.

Ампер, единица силы электрического тока, был определен как ток, производимый 1 вольт в 1 оме, т. е. как 0,1 ед. СГСМ\*.

Кулон, единица электрического заряда (количества электричества), определен как заряд, переносимый током в 1 ампер за 1 секунду, т. е. как 0,1 ед. СГСМ.

Фарада, единица электрической емкости, определена условием, что 1 кулон в 1 фараде дает 1 вольт. Она равна  $10^{-9}$  ед. СГСМ.

В 1889 г. на Втором конгрессе электриков в Париже были установлены еще три практические единицы — джоуль, ватт и генри.

Джоуль, единица работы и энергии, был определен как энергия, выделяемая в виде тепла за 1 секунду током в 1 ампер, протекающим по сопротивлению в 1 ом. Джоуль равен  $10^7$  эрг.

Ватт, единица мощности, равен 1 джоулю в 1 секунду, т. е.  $10^7$  ед. СГС, или  $10^7$  эрг/с.

Генри, единица индуктивности, равен  $10^9$  ед. СГСМ. Название генри дано лишь в 1893 г. Первоначально эту единицу называли квадрантом, поскольку в системе СГСМ единица индуктивности есть сантиметр, а  $10^9$  см — это длина четверти земного меридиана.

Произведенные еще ранее в ряде стран измерения выявили отличие единицы электрического сопротивления Британской ассоциации от точного значения —  $10^9$  ед. СГСМ — более чем на 1 %. Поэтому со всей тщательностью был изготовлен новый вещественный эталон ома, а также эталоны ампера и вольта. Но в дальнейшем выяснилось, как и следовало ожидать, что между изготовленными эталонами и их прособразамися имеются хотя и небольшие, но все же ощутимые расхождения — порядка нескольких сотых долей процента. Было решено принять эти эталоны в качестве законных между-

---

\* Из этого и приведенных ниже определений видно, что в то время допускались сравнительно вольные формулировки.

народных практических единиц. Наряду с абсолютными практическими единицами, базирующимися на системе СГСМ, возникла и другая, так называемая международная практическая система единиц, в которую входили международный ом, международный ампер и т. д.

Однако одновременное существование двух практических систем электрических и магнитных единиц приводило к множеству неудобств.

В 1908 г. в Лондоне была создана Международная конференция, которая постановила, что за основу должны приниматься абсолютные практические единицы, определенные по электромагнитной системе СГСМ.

Официально абсолютные практические единицы были введены, а международные практические единицы окончательно упразднены лишь с января 1948 г. Название «абсолютные» в настоящее время вышло из употребления.

С созданием метрической системы мер и весов стала особенно актуальной всегда существовавшая проблема определения основных единиц и выбора или изготовления их эталонов. Первоначально стремились пользоваться эталонами, которые давала сама природа. Но первое измерение длины Парижского меридиана, как выяснилось со временем, было недостаточно точным. Затем стало ясно, что Земля непрерывно меняет свои размеры, а точность измерительных методов непрерывно возрастает.

Поэтому созданная в 1870 г. Международная комиссия по изучению метрической системы после долгих обсуждений приняла решение «не гоняться за прозрачной неизменной величиной», а довольствоваться изготовленным металлическим эталоном метра, считая его неизменным независимо от последующих достижений науки. Аналогичное решение было принято и в отношении эталона килограмма.

Но в результате использования вещественных эталонов стали обнаруживаться расхождения между единицами физических величин при их определении различными способами. Например, литр как объем одного килограмма воды оказался несколько отличающимся от кубического дециметра.

С установлением единиц электрических и магнитных величин число несоответствий такого рода возросло. Определенные по вещественным эталонам международные единицы ампер, вольт и ом не только отличались от их абсолютных прототипов, но и не соответствовали друг другу — ампер отличался от тока, производного 1 вольт в 1 оме.

Развитие науки и возросшая точность измерений позволили отказаться от использования многочисленных искусственно изготовляемых эталонов и вернуться к эталонам, которые даны нам самой природой. Так, оказалось возможным определить метр, связав его с длиной волны некоторой спектральной линии (1960 г.)\*, а затем со скоростью света в вакууме (1983 г.) Однако не для всех основных единиц удалось использовать естественные эталоны. Единица массы, например, все еще определяется как масса международного прототипа килограмма.

---

\* Это определение гласило: «Метр равен 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атома криптона-86» [1].

## 5. СИСТЕМЫ СГС И МКСА. ПРОЦЕСС ОТБОРА И ОБЪЕДИНЕНИЯ СИСТЕМ

После принятия в 1881 г. электростатической и электромагнитной систем (СГСЭ и СГСМ) со временем появилась новая система — гауссова система единиц, называемая также просто системой СГС. Она представляет своеобразное объединение двух систем. Электрические единицы гауссовой системы взяты из системы СГСЭ, а магнитные единицы — из системы СГСМ.

На основе системы СГС были установлены также единицы для других областей физики — единицы акустических, тепловых, светотехнических величин и единицы ионизирующих излучений.

Признание и распространение теорин электромагнетизма, созданной Максвеллом в 1860—1865 гг., привело к пониманию невозможности свести электрические и магнитные явления к механике. Возникает стремление строить системы электрических и магнитных единиц не на трех, а на четырех основных единицах, добавляя к единицам длины, массы и времени еще и единицу какой-либо электрической или магнитной величины.

Появляются четыре новые системы единиц: СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$ , предложенные в 1889 г. Рюкером, а также СГСФ и СГСБ. Роль четвертой основной единицы в них играют соответственно диэлектрическая проницаемость вакуума  $\epsilon_0$ , магнитная проницаемость вакуума  $\mu_0$ , электростатическая единица заряда — франклин (Фр) и электромагнитная единица силы электрического тока — био (Био).

Длительное время не было определенности в названиях магнитных единиц системы СГСМ и гауссовой системы. Ясность была внесена лишь в 1930 г., когда Международная электротехническая комиссия (МЭК), созданная в Стокгольме, дала этим единицам названия: эрстед — единица напряженности магнитного поля, гаусс — единица магнитной индукции, максвелл — единица магнитного потока, гильберт — единица магнитодвижущей силы.

В 1892 г. английский физик Хевисайд обнаружил возможность рационализировать уравнения электромагнетизма, придав им более простой и логичный вид. В результате число возможных систем единиц сразу удвоилось — каждая из систем могла быть рационализована или оставлена без изменения.

Во всех рассмотренных выше системах единиц, за исключением первоначальной системы Гаусса — Вебера, использовали в качестве основных единиц сантиметр, грамм и секунду. Даже практические единицы ом, вольт и другие были введены как кратные единицам системы СГСМ.

В 1901 г. итальянский инженер Джорджи предложил систему единиц МКС, в которой за основные единицы приняты метр, килограмм и секунда. Эти единицы были выбраны с таким расчетом, чтобы образованные на их основе единицы энергии и мощности совпали по размеру с практическими единицами — джоулем и ваттом. При таком выборе добавление одной из практических электрических единиц в качестве четвертой основной единицы позволяло получить систему не только механических, но электрических и магнитных единиц, в которую оказывались включенными все остальные практические единицы. Позднее за четвертую основную единицу был принят ампер, и система Джорджи получила наименование МКСА (метр — килограмм — секунда — ампер).

На основе системы МКС с добавлением соответствующей чет-

вертой основной единицы были построены системы единиц и для других областей физики. Путем добавления единицы термодинамической температуры — кельвина — получили систему тепловых единиц МКСК. Добавление единицы силы света — свечи (канделы) — позволило построить систему светотехнических единиц МКСС, и т. д.

Другие варианты выбора основных единиц не были столь удачными.

Во Франции была предложена и в 1919 г. узаконена система МТС, в которой основными единицами являются метр, тонна и секунда. Система МТС применялась также и в СССР с 1933 по 1955 г.

Широкое распространение одно время получила так называемая техническая система единиц, или МКГСС, с основными единицами метр, килограмм-сила, секунда. Это единственная система, в которой за одну из основных единиц принята единица силы.

При теоретических научных исследованиях иногда применяют так называемые естественные системы единиц, основанные на физических константах. Первую из таких систем предложил Планк в 1906 г. Основными единицами в ней являются скорость света в вакууме, гравитационная постоянная, постоянная Больцмана и постоянная Планка.

Унификация единиц, получившая с созданием Метрической системы мощный импульс и заметно продвинувшаяся к 1875 г., в дальнейшем сменилась появлением и распространением многочисленных и разнообразных систем единиц. В первые десятилетия XX в., как видно из сказанного выше, насчитывалось едва ли не два десятка различных систем единиц. Проблема унификации единиц снова стала актуальной. Но одновременно с размножением систем единиц шел и обратный процесс их практического отбора, в значительной мере стихийного, а также сознательно направляемый процесс объединения некоторых систем. Хронологическая схема развития и отбора систем единиц представлена на рис. 1.

Гауссова система единиц, созданная как своеобразная комбинация систем СГСЭ и СГСМ, оттеснила сами эти системы на задний план. Родственные им системы СГС<sub>ε<sub>0</sub></sub>, СГС<sub>μ<sub>0</sub></sub>, СГСФ, СГСБ не нашли сколько-нибудь заметного применения. Гауссова система устояла и против процесса рационализации, сохранив свою классическую иерархизированную форму.

Техническая система МКГСС вследствие выбора такой основной единицы, как килограмм-сила, оказалась непригодной ни в одной области явлений, кроме механики.

Единицы системы МТС в своем большинстве имели размеры, мало удобные для практики, хотя единица массы — тонна — и была подходящей в некоторых отраслях производства.

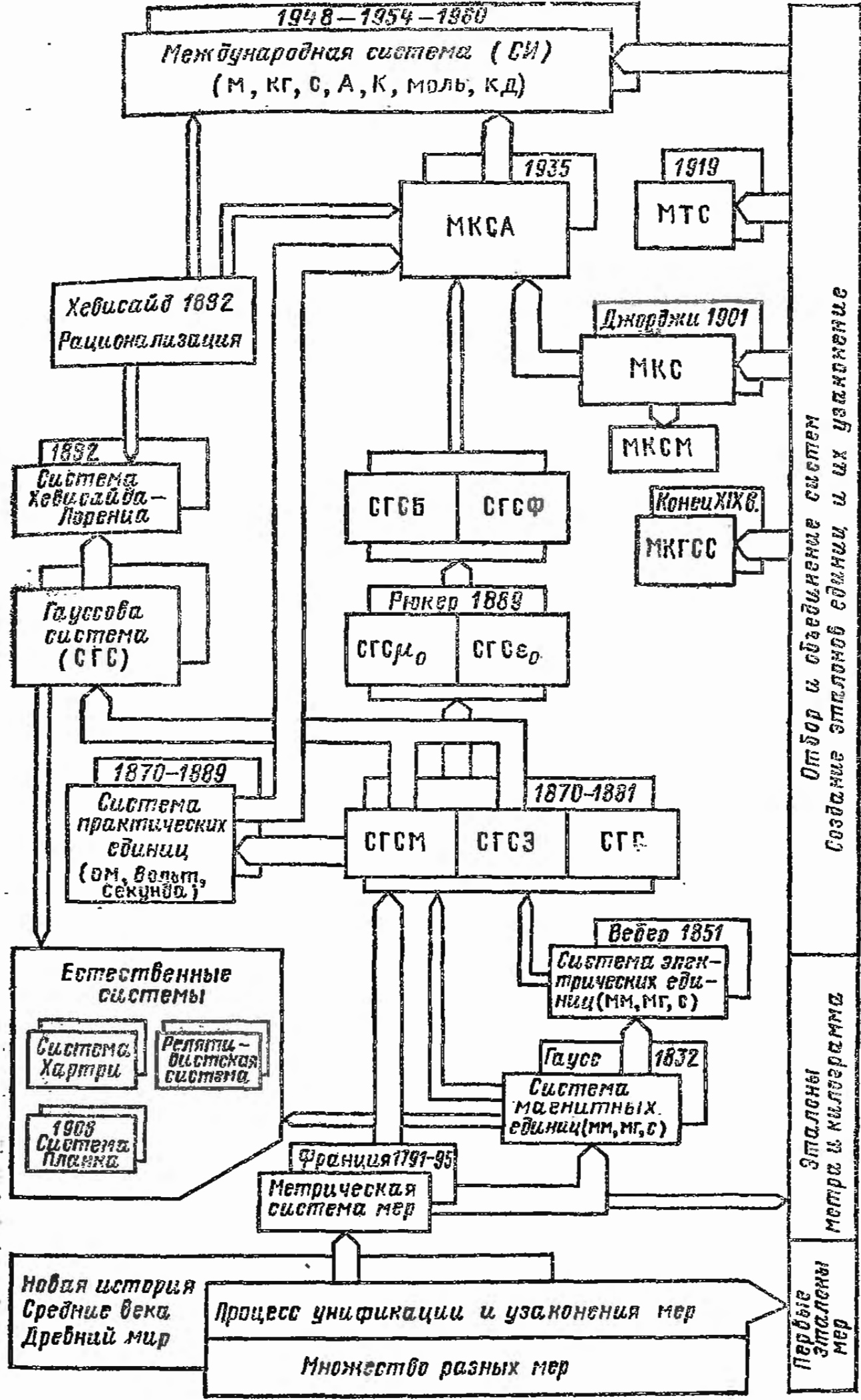
Естественные системы единиц если и имели известные преимущества при теоретических исследованиях, заведомо не могли получить распространения в технике и народном хозяйстве. Единицы их нельзя даже назвать неудобными, они выглядят буквально экзотическими. Так, в системе Планка единица длины — порядка  $10^{-35}$  м.

Международные единицы, лишь ничтожно отличавшиеся от практических единиц, как уже говорилось, постепенно сошли со сцены.

---

Рис. 1. Хронологическая схема создания, отбора и объединения систем единиц





Практические электрические и магнитные единицы ампер, вольт, генри и другие органически вошли в состав системы МКСА. Решение присоединить систему практических единиц к системе МКС вынесла летом 1935 г. МЭК на основе референдума, проведенного между электротехническими комитетами различных стран при участии генерального секретаря Международного союза чистой и прикладной физики. Уравнения и единицы электромагнетизма в системе МКСА стали применять в рационализованной форме.

На том же съезде МЭК летом 1935 г. было решено для практической единицы магнитного потока принять название вебер, для единицы частоты рекомендовать название герц и для практической единицы электрической проводимости — название сименс. Название единицы проводимости «мо» было признано неправильным.

Таким образом, к началу второй мировой войны в результате процесса унификации единиц физических величин преобладающее значение и распространение получила система единиц МКСА, к которой естественно примыкали образованные на основе МКС системы тепловых, светотехнических, акустических и других единиц (рис. 1). Кроме того, определенное распространение, главным образом при теоретических исследованиях, имела система СГС, или гауссова, вместе с построенными на ее основе тепловыми и другими единицами.

Вопрос о создании Международной системы единиц впервые был поднят еще в 1913 г. на V Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ). Однако подготовка Международной системы единиц вступила в практическую стадию лишь в середине XX в.

В 1948 г. Международный союз чистой и прикладной физики представил на IX ГКМВ предложение о принятии Международной практической системы единиц с основными единицами — метром, килограммом, секундой и одной из практических электрических единиц. Одновременно IX ГКМВ получила от французского правительства проект международной унификации единиц. В частности, этот проект предусматривал принятие механических единиц системы МКС и практических единиц электромагнетизма системы МКСА.

X ГКМВ в 1954 г. решила, что Международная система должна быть универсальной, т. е. охватывать все области измерений, и в качестве ее основных единиц следует принять метр, килограмм, секунду, ампер, градус Кельвина и свечу (канделу).

Наконец, в 1960 г. XI ГКМВ приняла решение:

а) присвоить системе, основанной на шести основных единицах, наименование «Международная система единиц»;

б) установить международное сокращенное наименование этой системы «SI» (от начальных букв *Système International*);

в) ввести таблицу приставок для образования десятичных кратных и дольных единиц;

г) образовать 27 производных единиц Международной системы с возможным добавлением в будущем и других производных единиц.

Уже после XI ГКМВ в Международную систему была добавлена седьмая основная единица — моль — единица количества вещества. Кроме того, наименование «градус Кельвина» заменено более коротким «кельвин».

В русской транскрипции Международная система сокращенно именуется «СИ».

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА

## 6. ДАТЫ ВВЕДЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ

В Советском Союзе переход на Международную систему единиц осуществлялся в два этапа. С 1 января 1963 г. Международная система была введена как предпочтительная во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании (ГОСТ 9867—61).

С 1 января 1982 г. единицы Международной системы подлежат обязательному применению в СССР. С этой даты действует ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин» [1], введенный постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 марта 1981 г. № 1449. ГОСТ 8.417—81 соответствует СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» [2], утвержденному Постоянной комиссией по стандартизации в Софии в июне 1978 г.

Единицы СИ должны применяться во всей вновь разрабатываемой технической документации и в публикациях, а также в учебных процессах всех учебных заведений. Оговорено применение и некоторых единиц, не входящих в СИ. Градуировка средств измерения должна производиться в единицах СИ или внесистемных единицах, допускаемых к применению стандартом.

Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикации их результатов. ГОСТ 8.417—81 не распространяется также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам (таким как шкалы твердости Роквелла и Виккерса, шкала светочувствительности фотоматериалов и др.).

7. ОСНОВНЫЕ И ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ.  
РАЗМЕРНОСТЬ

Создание Международной системы единиц явилось результатом длительного процесса развития и отбора систем единиц физических величин. В ее основу положены научные принципы, впервые сформулированные Гауссом в 1832 г. [8].

Измерить физическую величину — значит найти ее отношение к другой физической величине того же рода, принятой за единицу. Каждая физическая величина, таким образом, есть произведение ее числового значения (обозначаемого фигурными скобками) на принятую единицу (обозначаемую квадратными скобками):

$$X = \{X\} [X]; \quad Y = \{Y\} [Y]; \quad Z = \{Z\} [Z].$$

Очевидно, чем крупнее единица, тем меньше числовое значение данной физической величины, и наоборот.

Между физическими величинами разного рода существуют связи, выражаемые физическими уравнениями. Физическое уравнение во многих случаях имеет вид степенной зависимости, например

$$Z = GX^{\kappa} Y^{\lambda},$$

где  $G = \{G\} [G]$  — постоянная физическая величина,  $\kappa$  и  $\lambda$  — постоянные числа. При степенной зависимости между величинами аналогичным уравнениям удовлетворяют порознь и единицы, и числовые

значения физических величин:

$$[Z] = K [G] [X]^{\alpha} [Y]^{\lambda}, \quad \{Z\} = \frac{1}{K} \{G\} \{X\}^{\alpha} \{Y\}^{\lambda}.$$

Здесь  $K$  — числовой коэффициент.

Физические уравнения могут быть как определениями физических величин, так и формулировками физических законов. Впрочем, это деление не всегда можно провести достаточно четко.

Система единиц по Гауссу строится на некотором числе единиц, выбираемых в качестве основных. Физические величины, к которым относятся эти единицы, также называют основными. Размер каждой из основных единиц выбирается независимо от других единиц и в известной мере произвольно, но с учетом удобства их практического применения. В Международной системе наряду с основными введены еще и так называемые дополнительные единицы.

Единицы всех других физических величин образуются как производные от основных и дополнительных единиц и определяются уравнениями, выбираемыми из существующего множества физических уравнений. Размер каждой из производных единиц, таким образом, не произволен и однозначно зависит от размера основных единиц и вида определяющего уравнения. В качестве определяющих выбираются лишь физические уравнения, сводящиеся к степенным зависимостям.

Международная система построена на семи основных и двух дополнительных единицах. Основными единицами СИ являются:

метр — единица длины,  
килограмм — единица массы,  
секунда — единица времени,  
ампер — единица силы электрического тока,  
кельвин — единица термодинамической температуры,  
моль — единица количества вещества,  
кандела — единица силы света (прежнее русское название канделы — свеча).

Две дополнительные единицы СИ:

радиан — единица плоского угла,  
стерадиан — единица телесного угла.

Приняты определения основных и дополнительных единиц, приведенные в табл. III.

Образование производных единиц по их определяющим уравнениям не представляет трудностей.

Так, скорость определяют как отношение пути  $ds$ , пройденного за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$v = ds/dt.$$

Согласно ее определяющему уравнению скорость выражается в метрах в секунду. Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м\*.

Выбор определяющих уравнений подчиняется тому естественному условию, что в каждое из них помимо определяемой величины должны входить лишь основные величины или величины, единицы

---

\* Это и ряд последующих определений в гл. 2 и 3 приводятся по руководящим нормативным документам [6, 7].

которых уже определены ранее. Это условие приводит к установлению некоторой очередности в последовательном образовании производных единиц и использовании определяющих уравнений.

Так, ускорение есть отношение приращения скорости  $dv$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$a = dv/dt = d^2 s/dt^2.$$

Поэтому единицу ускорения устанавливают лишь после того, как образована единица скорости. Таким образом, ускорение выражается в метрах на секунду в квадрате. Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с. Эта единица приблизительно в 10 раз меньше ускорения свободного падения (ускорения силы тяжести) у поверхности Земли.

Если производная единица определяется уравнением с единичным коэффициентом  $K=1$

$$[Z] = [G] [X]^x [Y]^y,$$

ее называют согласованной или когерентной. В этом случае уравнение между числовыми значениями величин принимает вид

$$\{Z\} = \{G\} \{X\}^x \{Y\}^y$$

и совпадает по форме с физическим уравнением.

Примерами когерентных производных единиц могут служить единицы скорости и ускорения. Приведем и другие примеры:

$$\text{ватт} = \frac{\text{джоуль}}{\text{секунда}}; \quad \text{вебер} = \text{вольт} \cdot \text{секунда}; \quad \text{тесла} = \frac{\text{ньютон}}{\text{ампер} \cdot \text{метр}}.$$

А вот пример некогерентности:

$$\text{гаусс} = \frac{1}{\zeta} \frac{\text{дина} \cdot \text{секунда}}{\text{франклин} \cdot \text{сантиметр}} \quad (\zeta \approx 3 \cdot 10^{10}).$$

В Международной системе все производные единицы когерентны, и она в целом представляет когерентную, или согласованную, систему. В когерентных системах ввиду совпадения по форме всех числовых уравнений с физическими нет надобности проводить различие между теми и другими.

Условия когерентности и последовательности образования производных единиц не являются совершенно жесткими и оставляют некоторую свободу как в выборе определяющих уравнений, так и в очередности образования производных единиц.

Физические величины и их единицы с качественной стороны характеризуются так называемой размерностью. Каждой из основных величин приписывают свою особую, независимую от других размерность. Размерность длины обозначают символом  $L$ , размерность массы —  $M$ , времени —  $T$ , силы электрического тока —  $I$ , термодинамической температуры —  $\Theta$ , количества вещества —  $N$ , силы света —  $J$ .

Размерности всех других величин выражают через размерности основных величин. Размерность физической величины — выражение, показывающее, как изменилась бы единица этой величины с изменением размера основных единиц. Размерность в общем случае имеет вид

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (1)$$

и представляет собой произведение размерностей основных физических величин, возведенных в те или иные степени, называемые показателями размерности. Единица физической величины соответственно представляет произведение основных единиц, возведенных в те же степени, и двух дополнительных единиц в соответствующих степенях:

$$[Z] = \text{м}^{\alpha} \cdot \text{кг}^{\beta} \cdot \text{с}^{\gamma} \cdot \text{А}^{\delta} \cdot \text{К}^{\epsilon} \cdot \text{моль}^{\zeta} \cdot \text{кд}^{\eta} \cdot \text{рад}^{\Lambda} \cdot \text{ср}^{\text{В}}. \quad (2)$$

Размерность производной единицы, таким образом, видна и непосредственно из ее выражения через основные единицы.

Выражения вида (1) нередко называют формулами размерности. Обозначение  $\dim$  происходит от слова dimension — размер, размерность, измерение\*. Показатели размерности могут быть положительными, равными нулю или отрицательными. В Международной системе все они целочисленны.

Размерность производной единицы, как и ее размер, устанавливается по ее определяющему уравнению. Так, размерности скорости  $v = ds/dt$  и ускорения  $a = dv/dt$  имеют вид

$$\dim v = LT^{-1}; \quad \dim a = LT^{-2}.$$

При выборе других по размеру единиц длины и времени единица скорости изменилась бы пропорционально единице длины и обратно пропорционально единице времени, а единица ускорения — пропорционально единице длины и обратно пропорционально квадрату единицы времени.

Для каждой из основных единиц один из семи показателей размерности  $\alpha$ — $\eta$  равен единице, а остальные — нулю. Для производных единиц некоторые из показателей размерности также равны нулю. Например, для скорости  $\alpha=1$ ,  $\gamma=-1$ ,  $\beta=\delta=\epsilon=\zeta=\eta=0$ .

Относительные величины, т. е. отношения двух однородных физических величин — двух длин, двух площадей и т. п., имеют нулевую размерность, или безразмерны. В частности, безразмерны плоский угол, телесный угол и их единицы — обе дополнительные единицы СИ.

Понятие размерности имеет много практических применений. Простейшее из них, к которому весьма часто прибегают, состоит в контроле правильности физических уравнений. В каждом из уравнений левая и правая части должны быть одинаковой размерности. Разумеется, такая проверка не является исчерпывающей, однако ввиду ее простоты довольно полезна. О других применениях размерности говорится в гл. 4 и в § 31. В § 32 дано понятие об анализе размерностей и теории подобия.

Многие физические величины, строго говоря, определяются дифференциальными или интегральными выражениями, причем некоторые из величин являются векторами. Так, скорость есть производная от пути по времени, ускорение — производная от скорости по времени:

$$v = ds/dt; \quad a = dv/dt.$$

Магнитный поток есть интеграл магнитной индукции по поверхности:

$$\Phi = \int B dS,$$

---

\* Размерность нередко обозначают заключением символа величины в квадратные скобки, что имеет ряд преимуществ. Но здесь такое обозначение используется для единиц физических величин.

и т. д. Во избежание излишней громоздкости эти выражения ниже нередко в определяющих уравнениях заменены просто дробями или произведениями, а векторы обозначены как скаляры, например

$$v = s/t, \quad a = v/t, \quad \Phi = BS.$$

Такие замены, разумеется, не влияют на размер и размерность единиц.

Электрические и магнитные единицы Международной системы образуются на основе рационализованных уравнений электромагнитного поля. Рационализация приводит к удалению коэффициентов  $4\pi$  и  $2\pi$  из наиболее часто применяемых формул и к введению их в формулы, употребляемые сравнительно редко. Однако гораздо важнее то обстоятельство, что коэффициенты  $4\pi$  и  $2\pi$  удаляются из уравнений, где наличие их не может быть логично обосновано, и появляются в уравнениях, относящихся к полям со сферической или цилиндрической симметрией. Подробнее о рационализации говорится в гл. 6.

В табл. П2—П7 приведены определяющие уравнения, размерности и обозначения производных единиц СИ. Имеющиеся в ГОСТ 8.417—81 примеры охватывают около 50 производных единиц. Таблицы П2—П7 содержат в несколько раз большее число единиц.

16 производных единиц, подобно амперу и кельвину, названы по имени ученых: герц, ньютон, паскаль, джоуль, ватт, кулон, вольт, фарад, ом, сименс, вебер, тесла, генри, беккерель, грей, зиверт. Обозначения этих единиц пишутся с прописной (заглавной) буквы, например А, Гц, Дж.

Специальные наименования имеют и еще две производные единицы — люмен и люкс. Единицы со специальными наименованиями могут использоваться для образования других производных единиц (например, кулон на кубический метр, грей в секунду).

## 8. КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ, ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ И ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

При весьма значительных диапазонах изменения величин в современной науке и технике наряду с основными и производными единицами совершенно необходимы также и единицы, кратные им или составляющие от них некоторые доли.

В Международной системе кратные и дольные единицы, их наименования и обозначения образуются посредством десятичных множителей и приставок, приведенных в табл. П8.

Как можно видеть из этой таблицы, множители следуют с интервалами изменения в  $10^3$  раз, а между приставками кило и милли — с изменениями в 10 раз. Выбирать приставки рекомендуется так, чтобы числовые значения величин находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

Для снижения вероятности ошибок при расчетах рекомендуется подставлять десятичные кратные и дольные единицы только в конечный результат, а в процессе вычислений не применять кратных и дольных единиц, заменив с этой целью приставки степенями числа 10.

Применение десятичных приставок полностью избавляет от неудобств, свойственных большинству исторически сложившихся систем единиц из-за их несоответствия десятичной системе исчисления. Кроме того, не требуется давать и держать в памяти специальные

названия многочисленных кратных и дольных единиц. Приставка сама указывает на отношение данной единицы к исходной основной или производной единице. Присваивать кратным и дольным единицам специальные наименования не разрешается.

В названии одной из основных единиц СИ — единицы массы, килограмма — уже использована приставка «кило». В связи с этим принцип образования кратных и дольных единиц в отношении единиц массы нарушается. Названия этих единиц образуются путем присоединения десятичных приставок к наименованию не основной единицы — килограмма, а единицы грамм. Например, единица, равная  $10^{-6}$  кг, носит название не микрокилограмм, а миллиграмм.

Однако, если строго следовать этому предписанию, для единицы в  $10^3$  кг следует применять название мегаграмм. Единица же тонна, хотя и допускается к применению, согласно ГОСТ рассматривается как внесистемная единица.

На практике отходят от указанного предписания. Из единиц, образованных присоединением приставок к наименованию грамм, применяют только килограмм и единицы, меньшие грамма. А названия единиц, больших тонны, образуют посредством приставок к наименованию тонна, например, килотонна, мегатонна и т. д.

Стандарт устанавливает ряд правил образования и написания названий кратных и дольных единиц. В частности, не допускается присоединение к наименованию единицы двух или более приставок. Единицу, равную  $10^{-6}$  с, следует называть микросекундой, но не миллимиллисекундой. Для единицы  $10^{-9}$  м надо применять название нанометр (нм), но не миллимикрометр или миллимикрон. Если исходная единица образована как произведение или отношение единиц, приставку следует присоединять, как правило, к первому из слов ее названия. Например, вместо наименования метр в миллисекунду надо писать километр в секунду. Однако допускаются и исключения, например употребляют единицу, называемую вольт на сантиметр. Нельзя сокращать наименования приставок. В частности, следует применять название мегаом, а не мегом. Впрочем, последнее предписание на практике часто не выполняется.

Пределы относительного изменения некоторых физических величин настолько широки, что представление их в линейном масштабе практически невозможно. Используют гораздо более компактные логарифмические шкалы, применяют логарифмические величины и их единицы.

ГОСТ 8.417—81 допускает без ограничения срока применение относительных и логарифмических единиц, за исключением единицы непер.

Пусть  $Y$  — рассматриваемая физическая величина (например, звуковое давление или сила света),  $Y_0$  — ее исходный уровень,  $a$  — некоторое постоянное число, большее единицы. Относительное изменение физической величины выражают в виде соответствующей степени числа  $a$ :

$$Y/Y_0 = a^x .$$

Если показатель степени  $x$ , т. е. логарифм отношения  $Y/Y_0$ , возрастает на единицу, величина  $Y$  возрастает в  $a$  раз. Таким образом, логарифмическая единица представляет относительное возрастание рассматриваемой величины  $Y$  в  $a$  раз. В качестве постоянного числа  $a$ , называемого основанием, можно выбрать, например, одно из



$$a = 10; \quad a = e = 2,718\dots; \quad a = 2.$$

В случаях, когда целесообразны более мелкие логарифмические единицы, в качестве основания выбирают числа, более близкие к единице, например

$$a = \sqrt[10]{10} = 1,259\dots; \quad a = \sqrt[1200]{2} = 1,000578\dots$$

Относительные и логарифмические единицы представлены в табл. П9.

## 9. ПРИМЕНЕНИЕ ЕДИНИЦ, НЕ ВХОДЯЩИХ В СИ. УПОТРЕБЛЕНИЕ НАИМЕНОВАНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Стандарт допускает применение некоторых единиц, не входящих в Международную систему. Эти единицы разделены на три группы. К первой группе относятся единицы, допускаемые без ограничения срока наравне с единицами СИ. Кроме относительных и логарифмических сюда входят еще 18 единиц: минута, час и сутки; угловые градус, минута и секунда, а также град или гон; тонна, гектар, литр и диоптрия; вольт-ампер и вар; астрономическая единица, световой год, парсек, атомная единица массы и электрон-вольт.

Единицы второй группы допускается временно применять вплоть до принятия по ним соответствующих международных решений. Ко второй группе относятся 8 единиц: морская миля и узел; карат, текс, бар; оборот в секунду и оборот в минуту; непер.

Единицы третьей группы подлежат изъятию в предусмотренные сроки. Эта группа насчитывает 40 единиц (см. табл. П11).

Определения единиц всех трех групп приведены в § 29, а их размеры — в табл. П18.

В обоснованных случаях в отраслях народного хозяйства допускается применение единиц, не предусмотренных ГОСТ 8.417—81, путем введения их в отраслевые стандарты по согласованию с Государственным комитетом СССР по стандартам.

ГОСТ 8.417—81 и РД 50—160—79 устанавливают ряд правил употребления и написания наименований и обозначений единиц.

Наименование единицы, образованной как произведение единиц, пишут через дефис, а ее обозначение — через точку: джоуль-секунда (Дж·с, J·s); вольт-ампер (В·А, V·A). Склоняется при этом только последнее наименование: пять джоуль-секунд.

В наименовании, образованном как отношение единиц, пишут предлог «в», если характеризуется скорость протекания процесса, и предлог «на» во всех остальных случаях: метр в секунду, кулон на килограмм, метр на секунду в квадрате. Склоняется при этом первое наименование: пять метров в секунду. Обозначения таких единиц пишут через косую черту или с употреблением отрицательных показателей степени: м/с, Кл/кг, м/с<sup>2</sup> или м·с<sup>-1</sup>, Кл·кг<sup>-1</sup>, м·с<sup>-2</sup>.

Наименования генри, кюри, промилле, тесла не склоняются.

Наименования мужского рода, оканчивающиеся на мягкий согласный звук, в родительном падеже множественного числа получают окончание -ей: джоуль — джоулей, паскаль — паскалей.

Наименования женского рода, оканчивающиеся на -а, -я, в родительном падеже множественного числа пишут с нулевым окончанием: дина — дин, декада — декад, миля — миль, секунда — секунд.

С нулевым окончанием в родительном падеже множественного числа пишутся также и наименования мужского рода, оканчивающиеся на твердый согласный звук: ампер, бел, бит, бэр, вар, ватт, вебер, вольт, гаусс, герц, гильберт, гон, карат, кельвин, кулон, люкс, люмен, максвелл, нейтрон в секунду, непер, нит, ибютон, ом, парсек, пуаз, рад, радиан, резерфорд, рентген, сименс, стерадиан, стокс, торр, фарад, фон, фот, электрон-вольт, эрг, эрстед и др.

Из последнего правила есть исключения. Ряд наименований мужского рода в родительном падеже множественного числа пишется с окончанием на -ов: метров, литров, часов, оборотов в секунду, распадов в секунду, центнеров, узлов, а также градусов, веков, дюймов, футов и т. п.

Относительно обозначений единиц установлены следующие правила.

Буквенные обозначения единиц печатают прямым шрифтом, без точки как знака сокращения. В печатных изданиях допускается применять либо русские, либо международные обозначения единиц, но не те и другие одновременно (за исключением публикаций по единицам физических величин).

Правила написания обозначений единиц иллюстрируют следующие примеры (первые четыре из них относятся к расположению пробелов).

<i>Правильно:</i>	<i>Неправильно:</i>
100 кВт; 100 kW	100кВт; 100kW
80 %	80%
20 °C	20°C; 20° C;
20°	20 °
423,06 м; 423,06 m	423 м, 06; 423 m, 06
5,758° или 5°45,48', или 5°45'28,8"	5°,758 или 5°45',48, или 5°45'28",8
(100,0±0,1) кг	100,0±0,1 кг
50 г±1 г	50±1 г
от 50 до 100 кг	от 50 кг до 100 кг
$v=3,6 \text{ s/t}$ ,	$v=3,6 \text{ s/t км/ч}$ ,
где $v$ —скорость, км/ч;	где $s$ —путь в м;
$s$ —путь, м;	$t$ —время в с
$t$ —время, с	
$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ; $\text{W} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{Вт}/\text{м}^2/\text{К}$ ; $\text{W}/\text{м}^2/\text{К}$
$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ $\frac{\text{W}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ $\frac{\text{W}}{\text{м}^2}$
$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ $\frac{\text{W}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ $\frac{\text{W}}{\text{м}^2}$
$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , $\text{W}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ; $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}/\text{К}$ ; $\text{W} \cdot \text{м}^{-2}/\text{К}$
$\text{А} \cdot \text{м}^2$ ; $\text{Па} \cdot \text{с}$ ; $\text{А} \cdot \text{м}^2$ ; $\text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{Ам}^2$ ; $\text{Пас}$ ; $\text{Ам}^2$ ; $\text{Пас}$
$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; $\text{W}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ; $\text{W}/\text{м} \cdot \text{К}$
80 км/ч	80 км/час
80 километров в час	80 км в час

Допускается применять сочетание специальных знаков ...°, ...', ...", % и ‰ с буквенными обозначениями единиц, например ...°/с.

Из приведенных примеров видно, что буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на

средней линии как знаками умножения (в машинописных текстах допускается точку не поднимать). Вместо точки можно оставлять и пробел, если это не приводит к недоразумениям. В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления должна применяться только одна черта, косая или горизонтальная.

В документации, относящейся к договорно-правовым и экономическим отношениям с зарубежными странами, применяют международные обозначения единиц. Но в документации на экспортную продукцию, если эта документация не отправляется за границу, допускается применять русские обозначения. В технической документации на различные виды изделий и продукции, используемые только в СССР, применяют предпочтительно русские обозначения единиц.

На табличках, шкалах и щитках средств измерений применяют международные обозначения единиц независимо от того, какие обозначения были использованы в документации на эти средства измерений.

## 10. ПРЕИМУЩЕСТВА МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ

В заключение отметим ряд достоинств Международной системы единиц.

Международная система универсальна. Она охватывает все области физических явлений, все отрасли техники и народного хозяйства.

Международная система единиц органически включает в себя такие давно распространенные и глубоко укоренившиеся в технике частные системы, как метрическая система мер и система практических электрических и магнитных единиц (ампер, вольт, вебер и др.). Лишь система, в которую вошли эти единицы, могла претендовать на признание в качестве универсальной и международной.

Единицы Международной системы в большинстве достаточно удобны по своему размеру, а наиболее важные из них имеют и удобные на практике собственные наименования.

Построение Международной системы отвечает современному уровню метрологии. Сюда относится оптимальный выбор основных единиц, и в частности их числа и размеров; согласованность (когерентность) производных единиц; рационализованная форма уравнений электромагнетизма; образование кратных и дольных единиц посредством десятичных приставок.

В результате различные физические величины обладают в Международной системе, как правило, и различной размерностью. Это делает возможным полноценный размерный анализ, предотвращая недоразумения, например, при контроле выкладок. Показатели размерности в СИ целочисленны, а не дробны, что упрощает выражение производных единиц через основные и вообще оперирование с размерностью. Коэффициенты  $4\pi$  и  $2\pi$  присутствуют в тех и только тех уравнениях электромагнетизма, которые относятся к полям со сферической или цилиндрической симметрией. Метод десятичных приставок, унаследованный от метрической системы, позволяет охватить огромные диапазоны изменения физических величин и обеспечивает соответствие СИ десятичной системе исчисления.

Международной системе присуща достаточная гибкость. Она допускает применение и некоторого числа внесистемных единиц.

СИ — живая и развивающаяся система. Число основных единиц, недавно доведенное в ней до семи, может быть и еще увеличено, если это будет необходимо для охвата какой-либо дополнительной области явлений. В будущем не исключено также смягчение некоторых действующих в СИ регламентирующих правил.

Международная система, как говорит и само ее название, призвана стать повсеместно применяемой единственной системой единиц физических величин. Унификация единиц представляет давно назревшую необходимость. Уже сейчас СИ сделала ненужными многочисленные системы единиц, котировавшиеся еще несколько десятилетий назад.

Международная система единиц принята теперь более чем в 130 странах мира, в том числе в СССР и других странах СЭВ. В ряде стран установлены национальные программы перехода к Международной системе.

Международная система единиц признана многими влиятельными международными организациями, включая Организацию Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО). Среди признавших СИ — Международная организация по стандартизации (ИСО), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международный союз чистой и прикладной физики и др.

## Глава 3

# ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ

## 11. МЕХАНИКА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Образование производных единиц. В этом и последующих параграфах гл. 3 содержатся конкретные сведения о большинстве производных единиц Международной системы, а также о логарифмических и других единицах, допускаемых к применению наравне с единицами СИ. Основной материал по производным единицам для удобства сведен в табл. П2 — П7. Разумеется, этим отнюдь не охвачены все возможные единицы, множество которых, как и множество физических величин, неисчерпаемо.

Поскольку на практике можно встретиться с физическими величинами и их единицами, не представленными или недостаточно разъясненными в этой главе и приводимых таблицах, изложим еще раз в компактной форме порядок образования производных единиц. Сделаем это на примере образования единицы силы.

Основой для образования производной единицы физической величины и установления ее размерности служит определяющее уравнение. Оно связывает данную физическую величину с другими величинами, единицы которых предполагаются уже образованными ранее.

Так, согласно закону Ньютона сила  $F$  равна произведению массы тела  $m$  на его ускорение  $a$ , т. е. определяется уравнением

$$F = ma.$$

Размерность ускорения была установлена выше (§ 7):

$$\dim a = LT^{-2}.$$

Следовательно, сила и ее единица обладают размерностью

$$\dim F = \dim m \cdot \dim a = M \cdot LT^{-2} = LMT^{-2}.$$

Как уже говорилось, производная единица представляет собой произведение основных единиц, возведенных в степени, равные показателям размерности, и двух дополнительных единиц в соответствующих степенях. В данном случае символы размерности  $L$ ,  $M$  и  $T$  возведены в степени  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $\gamma=-2$ , а дополнительные единицы не нужны, так что единица силы есть метр-килограмм на секунду в квадрате. Этой единице присвоено наименование ньютон (Н).

Ньютон равен силе, придающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении действия силы. Заметим, что ньютон приблизительно равен весу гири массой 100 г.

Определяющие уравнения обычно достаточно ясно выражают связь между соответствующими физическими величинами. Определения производных единиц в свою очередь представляют просто словесные формулировки их определяющих уравнений. Поэтому в дальнейшем во многих случаях мы будем для краткости опускать и словесные формулировки определяющих уравнений, и определения единиц.

Для образования производных единиц геометрических величин (площади, объема или вместимости, кривизны и др.) достаточно одной основной единицы — единицы длины, метра. Для образования единиц механики, вообще говоря, необходимы три основные единицы (длины, массы и времени). Однако в кинематике можно обойтись лишь двумя из основных единиц — единицами длины и времени. Производные единицы механики приведены в табл. П2.

Энергетические единицы. Во всех областях физических явлений играют значительную роль такие величины, как работа и энергия, объемная плотность энергии, мощность, поток энергии, плотность потока энергии. Единицы и размерности этих величин, разумеется, не зависят от того, какие конкретные явления рассматриваются. Но в каждой области эти величины приобретают свою специфику, что отражается и в их наименованиях. Например, говорят о потоке звуковой энергии, тепловом потоке, потоке вектора Умова — Пойнтинга и т. д. Поэтому энергетические величины и их единицы представлены почти во всех параграфах этой главы и в табл. П2—П7.

Энергия и работа. Единицу и размерность энергии и работы проще всего установить, рассматривая механическую работу  $dW$ , производимую силой  $F$  при перемещении тела на расстояние  $ds$  в направлении действия силы:

$$dW = F ds.$$

Следовательно, работа и энергия имеют размерность

$$\dim W = L \dim F = L^2 MT^{-2}.$$

Единице энергии и работы, равной ньютон-метру, присвоено наименование джоуль (Дж). Джоуль есть работа, совершенная силой 1 Н при перемещении точки приложения силы на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Мощность есть отношение прироста энергии или работы  $dW$  на

интервале времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$P = dW/dt.$$

Мощность имеет размерность

$$\dim P = T^{-1} \dim W = L^2 MT^{-3},$$

а единица мощности — джоуль в секунду — носит название ватт (Вт).

Ватт равен мощности, при которой работа 1 Дж производится за время 1 с.

Поток энергии — отношение энергии  $dW$ , проходящей через данную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$P = dW/dt.$$

Поток энергии имеет ту же размерность

$$\dim P = L^2 MT^{-3}$$

и выражается в тех же единицах, что и мощность, т. е. в ваттах.

Объемная плотность энергии есть отношение энергии  $dW$ , заключенной в объеме  $dV$ , к этому объему:

$$w = dW/dV.$$

Эта величина имеет размерность  $L^{-1}MT^{-2}$  и выражается в джоулях на кубический метр.

Плотность потока энергии — отношение потока энергии  $dP$ , проникающего в элементарную сферу, к площади центрального сечения  $dS$  этой сферы:

$$P_1 = dP/dS.$$

Она имеет размерность  $MT^{-3}$  и выражается в ваттах на квадратный метр. Ватт на квадратный метр равен плотности потока энергии, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м<sup>2</sup> проникает поток энергии 1 Вт.

Удельная энергия — отношение энергии, заключенной в веществе, к его массе:

$$w_m = W/m.$$

Удельная энергия имеет размерность  $L^2T^{-2}$  и выражается в джоулях на килограмм.

Действие — физическая величина, имеющая размерность произведения энергии на время

$$\dim H = \dim W \cdot T = L^2MT^{-1}$$

и выражаемая в джоуль-секундах. Действие является одной из существенных характеристик движения системы. Квант действия — постоянная Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Нередко постоянной Планка называют также величину  $\hbar = h/2\pi = 1,0546 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Импульс, момент импульса и момент силы определяются уравнениями

$$p = mv; \quad L = pr = mvr; \quad M = Fr$$

и имеют размерности

$$\dim p = LMT^{-1}; \quad \dim L = L^2 MT^{-1}; \quad \dim M = L^2 MT^{-2}.$$

Их единицами являются соответственно килограмм-метр на секунду, килограмм-метр в квадрате на секунду, ньютон-метр.

Килограмм-метр на секунду равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

Килограмм-метр в квадрате на секунду равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1 кг·м/с.

Ньютон-метр равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.

Импульс называют также количеством движения (преимущественно и механике). Момент импульса имеет ту же размерность, что и действие, а момент силы — ту же размерность, что и работа.

Импульс силы — произведение силы на время ее действия:

$$S = Ft = mv_2 - mv_1.$$

Имеет ту же размерность, что и импульс. Выражается в ньютон-секундах.

Давление — отношение силы  $dF$ , действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади  $dS$  этого элемента:

$$p = dF/dS.$$

Давление обладает размерностью  $L^{-1}MT^{-2}$  и выражается в ньютонах на квадратный метр. Этой единице присвоено название паскаль (Па).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. Это сравнительно мелкая единица. Атмосферное давление составляет порядка 10<sup>5</sup> Па.

Нормальное и касательное напряжения  $\sigma$ ,  $\sigma_\tau$ , модуль продольной упругости (модуль Юнга)  $E = \sigma/\epsilon_n$ , модуль сдвига  $G = \sigma_\tau/\vartheta$ , модуль объемного сжатия — все эти величины имеют ту же размерность, что и давление, и выражаются в паскалях ( $\epsilon_n$  — относительное удлинение,  $\vartheta$  — угол сдвига).

Барический коэффициент зависящий от давления  $p$  физической величины  $Z$  есть логарифмическая производная этой величины по давлению:

$$\text{БК}(Z) = \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dp} = \frac{d}{dp} \ln \{Z\}.$$

Барический коэффициент имеет размерность  $LM^{-1}T^2$  и выражается в паскалях в минус первой степени.

Параметр Пашена — произведение расстояния между электродами разрядного промежутка в газе на абсолютное давление газа. Параметр Пашена имеет размерность  $MT^{-2}$  и выражается в паскаль-метрах.

Плотность  $\rho = m/V$  и удельный объем  $v = 1/\rho = V/m$  имеют размерности  $L^{-3}M$ ,  $L^3M^{-1}$  и выражаются в килограммах на кубический метр и в кубических метрах на килограмм соответственно. Плотность воды — около 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Градиент плотности

$$\text{grad } \rho = d\rho/dx$$

выражается в килограммах на метр в четвертой степени и имеет размерность

$$\dim \text{grad } \rho = L^{-4}M.$$

Массовый расход и объемный расход — отношение массы и объема вещества ко времени его перемещения:

$$Q_m = m/t; \quad Q_v = V/t.$$

Эти величины имеют размерность

$$\dim Q_m = MT^{-1}; \quad \dim Q_v = L^3 T^{-1}$$

и выражаются в килограммах в секунду и кубических метрах в секунду.

**Градиент скорости**

$$\text{grad } v = dv/dx$$

имеет размерность

$$\dim \text{grad } v = T^{-1}$$

и выражается в секундах в минус первой степени.

**Динамическая вязкость** (коэффициент вязкости, коэффициент внутреннего трения) есть отношение касательного напряжения  $F/S$  между слоями жидкости или газа к поперечному градиенту скорости  $dv/dl$ :

$$\eta = \frac{F}{S (dv/dl)}.$$

Из этого определяющего уравнения следует, что динамическая вязкость имеет размерность

$$\dim \eta = L^{-1} MT^{-1}$$

и выражается в паскаль-секундах. Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости, равной 1 м/с, равно 1 Па.

**Текучесть** — величина, обратная динамической вязкости. Обладает размерностью  $LM^{-1}T$  и выражается в паскалях в минус первой степени на секунду.

**Кинематическая вязкость** есть отношение динамической вязкости к плотности жидкости или газа:

$$\nu = \eta/\rho.$$

Имеет размерность

$$\dim \nu = \frac{L^{-1} MT^{-1}}{L^{-3} M} = L^2 T^{-1}$$

и выражается в квадратных метрах на секунду.

Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1 Па·с и плотностью 1 кг/м<sup>3</sup>.

**Коэффициент диффузии** есть отношение массы жидкости или газа к времени диффузии, площади поперечного сечения и градиенту плотности:

$$D = \frac{m}{St (d\rho/dx)}.$$

Он, как и кинематическая вязкость, выражается в квадратных мет-



рах на секунду и имеет размерность

$$\dim D = \frac{M}{L^2 T L^{-4} M} = L^2 T^{-1}.$$

Поверхностное натяжение, удельная поверхностная энергия — отношение силы поверхностного натяжения  $dF$  к длине участка контура  $dl$ , нормально к которому она действует, или, что то же самое, поверхностная плотность энергии поверхностного натяжения:

$$\alpha = dF/dl = W/S.$$

Имеет размерность

$$\dim \alpha = MT^{-2}$$

и выражается в ньютонах на метр или джоулях на квадратный метр.

Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности. Поверхностное натяжение воды приближенно равно 0,074 Н/м.

Коэффициент трения скольжения есть отношение силы трения к силе давления на опорную поверхность. Величина безразмерная.

Коэффициент трения качения — отношение момента тянущей силы к силе давления на опорную поверхность:

$$k = Fr/F_n.$$

Обладает размерностью длины  $L$  и выражается в метрах.

Момент инерции

$$J = mr^2,$$

имея размерность

$$\dim J = L^2 M,$$

выражается в килограмм-квадратных метрах.

Жесткость есть отношение приложенной силы к вызываемой ею линейной деформации:

$$k = F/\Delta l.$$

Выражается в ньютонах на метр и имеет размерность

$$\dim k = MT^{-2}.$$

Вес (сила тяжести), напряженность гравитационного поля (ускорение свободного падения) и потенциал гравитационного поля

$$P; \quad g = P/m; \quad \varphi = gs = Ps/m$$

имеют соответственно размерности

$$\dim P = LMT^{-2}; \quad \dim g = LT^{-2}; \quad \dim \varphi = L^2 T^{-2}.$$

Их единицы — ньютон, метр на секунду в квадрате (ньютон на килограмм) и джоуль на килограмм. В повседневном обиходе под весом тела фактически подразумевают его массу, выраженную в килограммах.

Удельный вес — отношение веса к объему:

$$\gamma = P/V.$$

Выражается в ньютонах на кубический метр и имеет размерность

$$\dim \gamma = L^{-2} MT^{-2}.$$

Удельный вес воды — приблизительно  $10^4$  Н/м<sup>3</sup>.

Угловая скорость — отношение угла поворота  $d\alpha$  вращающегося тела за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\omega = d\alpha/dt.$$

Обладает размерностью  $T^{-1}$  и выражается в радианах в секунду.

Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время 1 с поворачиваются относительно оси на угол 1 рад.

Угловое ускорение — отношение приращения угловой скорости  $d\omega$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\epsilon = d\omega/dt = d^2\alpha/dt^2.$$

Имеет размерность  $T^{-2}$  и выражается в радианах на секунду в квадрате.

Радиан на секунду в квадрате равен угловому ускорению равномерно вращающегося тела, при котором оно за время 1 с изменяет угловую скорость на 1 рад/с.

Частота вращения — отношение числа циклов вращения, не подделяемых на части (полных оборотов)  $N$ , за интервал времени  $t$  к этому интервалу времени:

$$n = N/t.$$

Обладает размерностью  $T^{-1}$  и выражается в секундах в минус первой степени.

Секунда в минус первой степени равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот. Такие единицы частоты вращения, как оборот в секунду и оборот в минуту, подлежат изъятию из обращения.

Периодические процессы характеризуются периодом  $T$ , частотой  $\nu = 1/T$ , угловой частотой  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$  и фазой  $\varphi$ .

Период  $T$  имеет размерность времени и выражается в секундах, частота и угловая частота обладают размерностью  $T^{-1}$ , фаза безразмерна. Разумеется, следует различать  $T$  — обозначение периода и  $T$  — символ размерности времени.

Частота  $\nu$  выражается в секундах в минус первой степени. Единице частоты присвоено наименование герц (Гц).

Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса.

Угловая частота выражается в радианах в секунду.

Фазу  $\varphi$  выражают в радианах или других единицах плоского угла, например в градусах. Иногда за единицу фазы принимают величину  $\tau = T/360 = 1/(360\nu)$ , которую называют электрическим градусом. В электрической сети частота  $\nu = 50$  Гц, так что  $\tau = 55, (5)$  мкс. При частоте  $\nu = 60$  Гц электрический градус равен  $\tau = 46, (296)$  мкс.

Механические колебания, как и колебания любой другой физической природы, в случае их линейности описываются выражением

$$x = A \exp(-\delta t) \cos(2\pi\nu t + \varphi_0)$$

и характеризуются начальной амплитудой  $A$ , частотой  $\nu$  или угловой частотой  $\omega = 2\pi\nu$ , начальной фазой  $\varphi_0$  и коэффициентом затухания  $\delta$ .

Безразмерную величину  $\theta = T\delta$  называют логарифмическим декрементом затухания.

Коэффициент затухания имеет размерность  $T^{-1}$  и выражается в секундах в минус первой степени.

Секунда в минус первой степени равна коэффициенту затухания, при котором за время 1 с амплитуда уменьшается в  $e$  раз.

Механические волны и волны иной физической природы помимо начальной амплитуды, начальной фазы и угловой частоты характеризуются также фазовой скоростью  $v_\phi$  (скоростью гребня волны), групповой скоростью  $v_{gr}$ , длиной волны  $\lambda = v_\phi T$ , волновым числом  $k = 2\pi/\lambda = \omega/v_\phi$  и коэффициентом ослабления  $a$ .

Волновое число имеет размерность  $L^{-1}$  и выражается в метрах в минус первой степени. В оптике и спектроскопии волновым числом часто называют величину, обратную длине волны:  $k = 1/\lambda$ .

Метр в минус первой степени равен волновому числу колебаний с длиной волны  $2\pi$ , а в оптике и спектроскопии — с длиной волны 1 м.

Коэффициент ослабления имеет размерность  $L^{-1}$  и выражается в метрах в минус первой степени.

Метр в минус первой степени равен коэффициенту ослабления, при котором на расстоянии в 1 м амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз.

## 12. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Производные единицы электромагнетизма представлены в табл. ПЗ. Для их образования необходимы четыре основные единицы — метр, килограмм, секунда и ампер. В области электрохимии используется также и единица количества вещества — моль, а при рассмотрении термохимических явлений и еще одна основная единица — кельвин.

Магнитная постоянная  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость вакуума в Международной системе — определяется из уравнения для силы взаимодействия двух параллельных электрических токов в вакууме:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

Согласно принятому определению ампера как одной из основных единиц (см. § 7)  $I_1 = I_2 = 1$  А при  $r = l = 1$  м и  $F = 2 \cdot 10^{-7}$  Н  $= 2 \cdot 10^{-7}$  м  $\times$   $\times$  кг  $\cdot$  с $^{-2}$ . Отсюда получают размерность и числовое значение магнитной постоянной:

$$\dim \mu_0 = LMT^{-2} I^{-2},$$

$$\mu_0 = \frac{2\pi r F}{I_1 I_2 l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}^* \text{ (точно).}$$

Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a = \mu_0 \mu$  имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и магнитная постоянная, т. е. в генри на метр. Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  и магнитная восприимчивость  $\kappa = \mu - 1$  безразмерны.

Электрическая постоянная  $\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума в СИ — определяется уравнением  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ ,

\* О единицах Гн, Ф (генри, фарад) см. с. 36 и 39.

связывающим ее со скоростью света в вакууме и магнитной постоянной, из которого следует

$$\dim \varepsilon_0 = \dim c^{-2} \dim \mu_0^{-1} = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2,$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кр}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Абсолютная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$  и абсолютная диэлектрическая восприимчивость  $\chi_a = \chi \varepsilon_0 = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0$  имеют ту же размерность и выражаются в тех же единицах, что и  $\varepsilon_0$ .

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и относительная диэлектрическая восприимчивость  $\chi = \varepsilon - 1$  безразмерны.

Электрический заряд (количество электричества) определяется как произведение силы электрического тока на время его протекания:

$$dq = I dt.$$

Заряд обладает размерностью  $TI$  и выражается в ампер-секундах. Эта единица носит название кулон (Кл).

Кулон равен электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при постоянном токе силой 1 А за время 1 с.

Напряженность электрического поля равна отношению силы  $F$ , действующей в электрическом поле на заряд  $q$ , к этому заряду:

$$E = F/q. \quad (3)$$

Напряженность электрического поля имеет размерность

$$\dim E = \dim F \dim q^{-1} = LMT^{-3} I^{-1}.$$

Ее единица — ньютон на кулон — носит название вольт на метр.

Вольт на метр есть напряженность электрического поля, действующего на заряд 1 Кл с силой 1 Н.

Электрический потенциал, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС) для электростатического поля определяются равенствами

$$\varphi = - \int E dt; \quad U = \varphi_1 - \varphi_2; \quad \mathcal{E} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (4)$$

Эти величины имеют размерность

$$\dim \varphi = \dim U = \dim \mathcal{E} = L^2 MT^{-3} I^{-1}$$

и выражаются в вольтах (В).

Вольт есть разность потенциалов (напряжение) между двумя точками постоянного электрического поля с напряженностью 1 В/м, находящимися на расстоянии 1 м вдоль линии поля.

ЭДС распространенного сухого гальванического элемента (элемента Лекланше) — около 1,5 В. Мощные линии электропередачи работают под напряжением до миллиона вольт и выше.

Электрическая емкость — отношение заряда  $dq$ , внесенного на уединенный проводник или пластины конденсатора, к вызываемому изменению потенциала  $d\varphi$  или напряжения  $dU$  на конденсаторе:

$$C = dq/d\varphi = dq/dU. \quad (5)$$

Имеет размерность

$$\dim C = TI/\dim U = L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$$

и выражается в кулонах на вольт. Единице электрической емкости присвоено наименование фарад (Ф).

Фарад равен емкости конденсатора, в котором при заряде 1 Кл напряжение между обкладками составляет 1 В.

Электрическое сопротивление — отношение напряжения между концами участка электрической цепи к силе тока на этом участке:

$$R = U/I. \quad (6)$$

Обладает размерностью

$$\dim R = I^{-1} \dim U = L^2 MT^{-3} I^{-2}$$

и выражается в вольтах на ампер. Эту единицу называют ом (Ом).

Ом равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе постоянного тока 1 А.

Электрическое смещение (электрическая индукция) может быть определено как произведение напряженности электрического поля на абсолютную диэлектрическую проницаемость:

$$D = \epsilon_a E = \epsilon_0 \epsilon E. \quad (7)$$

Поскольку  $\epsilon_0$  выражается в фарадах на метр, единица электрического смещения есть

$$\frac{\text{фарад}}{\text{метр}} \cdot \frac{\text{вольт}}{\text{метр}} = \frac{\text{кулон}}{\text{квадратный метр}},$$

а его размерность

$$\dim D = L^{-2} TI.$$

Кулон на квадратный метр равен электрическому смещению в вакууме при напряженности электрического поля, равной  $\{\epsilon_0\}^{-1}$  В/м, где  $\{\epsilon_0\}^{-1} = \{\mu_0 c^2\} \approx 36\pi \cdot 10^9$ .

Поток электрического смещения (электрической индукции) через данную поверхность определяется интегралом по этой поверхности:

$$\Psi = \int D dS.$$

Имеет размерность электрического заряда  $TI$  и выражается в кулонах.

Если поверхность замкнута, то по теореме Гаусса — Остроградского поток электрического смещения через нее равен алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности.

Электрический момент диполя есть произведение одного из разноименных зарядов диполя на расстояние между ними  $l$  (называемое плечом диполя):

$$p_e = ql.$$

Электрический момент диполя имеет размерность  $LTI$  и выражается в кулон-метрах.

Кулон-метр равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого.

Поляризованность есть отношение электрического (дипольного) момента  $dp_e$  вещества к его объему  $dV$ :

$$P = dp_e/dV.$$

Поляризованность имеет размерность  $L^{-2}TI$  и выражается в кулонах на квадратный метр, как и электрическое смещение. Поляризован-

ность, напряженность электрического поля и электрическое смещение связаны равенствами

$$D = \varepsilon_0 E + P; \quad P = \chi_a E = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0 E.$$

Линейная, поверхностная и объемная (пространственная) плотности электрического заряда определяются уравнениями

$$\tau_1 = dq/dl; \quad \sigma_1 = dq/dS; \quad \rho_1 = dq/dV$$

и обладают размерностями

$$\dim \tau_1 = L^{-1} T I; \quad \dim \sigma_1 = L^{-2} T I; \quad \dim \rho_1 = L^{-3} T I.$$

Они соответственно выражаются в кулонах на метр, кулонах на квадратный метр и кулонах на кубический метр.

**Плотность электрического тока**

$$J = dI/dS$$

имеет размерность

$$\dim J = L^{-2} I$$

и выражается в амперах на квадратный метр.

**Электрическая проводимость** есть величина, обратная электрическому сопротивлению:

$$G = 1/R = I/U.$$

Она обладает размерностью

$$\dim G = L^{-2} M^{-1} T^3 I^2.$$

Единице проводимости присвоено наименование сименс (См). В прошлом применялось также наименование мо («обратный ом»), но оно не получило официального признания.

**Удельное электрическое сопротивление**

$$\rho = RS/l$$

имеет размерность

$$\dim \rho = L^3 M T^{-3} I^{-2}$$

и выражается в ом-метрах. На практике  $S$  — площадь поперечного сечения проводника — часто приводят в квадратных миллиметрах, а  $l$  — длину проводника — в метрах, так что удельное сопротивление  $\rho$  оказывается выраженным в единицах

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{1 \text{ м}} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

**Удельная электрическая проводимость**  $\gamma$  (запасное обозначение —  $\sigma$ ) — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению:

$$\gamma = 1/\rho = Gl/S.$$

Она имеет размерность

$$\dim \gamma = L^{-3} M^{-1} T^3 I^2$$

и выражается в сименсах на метр.

Перейдем к магнитным единицам. Действие магнитного поля на электрический ток описывается уравнением

$$dF = I [dl \cdot B].$$

Магнитная индукция (плотность магнитного потока)  $B$  может быть определена как отношение силы  $dF$ , с которой магнитное поле действует на элемент тока  $I dl$ , направленный по нормали к линии поля, к этому элементу тока:

$$B = \frac{dF}{I dl} \quad (8)$$

Магнитная индукция имеет размерность

$$\dim B = MT^{-2} I^{-1}.$$

Единица магнитной индукции — ньютон на ампер-метр — носит наименование тесла (Тл). Тесла есть индукция магнитного поля, действующего на элемент тока  $1 \text{ А} \cdot \text{м}$ , направленный по нормали к линии поля, с силой  $1 \text{ Н}$ .

Магнитный поток — поток вектора магнитной индукции через данную поверхность, определяемый интегралом по этой поверхности:

$$\Phi = \int B dS. \quad (9)$$

Размерность магнитного потока есть

$$\dim \Phi = L^2 MT^{-2} I^{-1},$$

а его единица — тесла-квадратный метр — носит название вебер (Вб, Wb).

Вебер равен потоку магнитной индукции  $1 \text{ Тл}$  через поперечное сечение площадью  $1 \text{ м}^2$ .

Потокоцепление  $\Psi$  — сцепление магнитного потока с электрическим контуром — имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и магнитный поток, т. е. в веберах.

Индуктивность, взаимная индуктивность есть отношение потокоцепления, связанного с током в электрическом контуре, к силе этого тока:

$$L = \Psi/I, \quad M = \Psi/I. \quad (10)$$

Имеет размерность

$$\dim L = L^2 MT^{-2} I^{-2}$$

и выражается в веберах на ампер. Этой единице присвоено наименование генри (Гн, H).

Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней  $1 \text{ А}$  сцепляется магнитный поток  $1 \text{ Вб}$ .

Напряженность магнитного поля  $H$  — количественная характеристика магнитного поля, не зависящая от магнитных свойств среды и равная магнитной индукции, деленной на абсолютную магнитную проницаемость:

$$H = B/(\mu_0 \mu).$$

Поскольку  $\mu_0$  выражается в генри на метр, единицей  $H$  является

$$\text{тесла} \cdot \frac{\text{метр}}{\text{генри}} = \frac{\text{вебер}}{\text{квадратный метр}} \cdot \frac{\text{метр}}{\text{генри}} = \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}.$$

Ампер на метр равен напряженности магнитного поля в вакууме при магнитной индукции, равной  $\{\mu_0\}$  тесла. В прошлом для ампера на метр предлагалось название ленц.

Напряженность магнитного поля имеет размерность  $L^{-1}I$ .

Магнитодвижущая (намагничивающая) сила  $F_m$  — величина, характеризующая магнитное действие электрического тока и равная суммарной силе электрического тока в замкнутом контуре, охватывающем образующий магнитный поток. Магнитодвижущая сила равна циркуляции вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру, охватывающему электрические токи, создающие это магнитное поле:

$$F_m = \Sigma I = \oint H dl. \quad (11)$$

Магнитодвижущая сила имеет ту же размерность  $I$  и выражается в тех же единицах, амперах, что и сила электрического тока. Прежнее название ее единицы — ампер-виток — подлежит изъятию из обращения.

Магнитное сопротивление равно отношению магнитодвижущей силы  $dF_m$ , действующей на данном участке магнитной цепи, к магнитному потоку  $\Phi$ :

$$dR_m = dF_m/\Phi = H dl/\Phi.$$

Магнитное сопротивление имеет размерность  $L^{-2}M^{-1}T^2I^2$  и выражается в амперах на вебер, т. е. в генри в минус первой степени.

Генри в минус первой степени равен магнитному сопротивлению магнитной цепи, в которой магнитодвижущая сила 1 А создает магнитный поток 1 Вб.

Магнитная проводимость — величина, обратная магнитному сопротивлению:

$$G_m = 1/R_m.$$

Имеет размерность  $L^2MT^{-2}I^{-2}$  и выражается в генри.

Генри равен магнитной проводимости магнитной цепи с магнитным сопротивлением 1 Гн<sup>-1</sup>.

Магнитный момент контура с током (амперовский) есть произведение силы электрического тока в контуре на площадь, охватываемую контуром:

$$p_m = IS.$$

Имеет размерность  $L^2I$  и выражается в ампер-квадратных метрах.

Ампер-квадратный метр равен магнитному моменту электрического тока силой 1 А, проходящего по контуру площадью 1 м<sup>2</sup>.

Иногда магнитный момент контура с током определяют иначе:

$$p'_m = \mu_0 IS.$$

Этот магнитный момент называют кулоновским. Он имеет размерность

$$\dim p'_m = L^3 MT^{-2} I^{-1}$$

и выражается в вебер-метрах.

Магнитная масса (магнитный заряд, количество магнетизма)  $m$  — фиктивная величина, определяемая как отношение силы  $F$ , действующей на нее в магнитном поле, к напряженности этого магнитного поля  $H$ :

$$m = F/H.$$



Согласно этому уравнению магнитная масса имеет размерность магнитного потока и выражается в веберах:

$$\dim m = \frac{\dim F}{\dim H} = L^2 MT^{-2} I^{-1}.$$

Магнитный момент диполя, образованного двумя разноименными магнитными массами, отстоящими одна от другой на расстоянии  $l$ , имеет ту же размерность, что и кулоновский магнитный момент контура с током  $p'_m = \mu_0 IS$ :

$$\dim (ml) = \dim p'_m = L^3 MT^{-2} I^{-1}.$$

Магнитный момент диполя также выражают в вебер-метрах и называют кулоновским.

Остановимся на энергетических величинах в электротехнике и их единицах.

Электрическая мощность равна произведению силы тока на напряжение

$$P = IU$$

и выражается в ваттах. Но в электротехнике переменных токов различают активную, реактивную и полную мощность. В ваттах выражают только активную мощность. Реактивную и полную мощность выражают в единицах, носящих названия вар (вар) и вольт-ампер и численно равных ватту.

Электрическую энергию и работу можно определить как произведение электрического заряда на пройденную им разность потенциалов (напряжение):

$$dW = q dU,$$

или как произведение мощности на время:

$$dM = P dt.$$

Энергия и работа выражаются в джоулях. Однако оба приведенных определения использованы для установления и других, специальных единиц. В атомной физике широко применяется единица энергии, называемая электрон-вольт (см. § 29). В электротехнике и энергетике применяют такую единицу, как киловатт-час, равный  $3,6 \cdot 10^6$  Дж.

Объемная плотность энергии электромагнитного поля определяется равенством

$$w = ED/2 + BH/2$$

и выражается в джоулях на кубический метр.

Плотность потока электромагнитной энергии есть вектор Умова—Пойнтинга

$$S = P_1 = [EN].$$

Эта величина выражается в ваттах на квадратный метр.

Энергетические величины электромагнетизма, разумеется, по размерности не отличаются от соответствующих величин механики. В этом нетрудно убедиться, подставляя в приведенные выражения размерность входящих в них электрических и магнитных величин.

Приведем некоторые соотношения между единицами электромагнетизма:

кулон = фарад · вольт = ампер · секунда,  
 кулон · вольт = ньютон · метр = джоуль,  
 вольт = ом · ампер,  
 вольт · ампер = ватт,  
 генри · фарад = секунда в квадрате,  
 вебер = вольт · секунда = генри · ампер = тесла · метр квадратный,  
 генри = ом · секунда,  
 фарад · ом = секунда.

Ряд специальных величин и их единиц относятся к электрохимии.

**Степень диссоциации** — отношение числа молекул, распавшихся на ионы, к общему числу молекул растворенного вещества:

$$\alpha = n' / n.$$

Степень диссоциации — величина безразмерная.

**Коэффициент ионизации** есть отношение числа молекул, распадающихся за данное время, к числу нейтральных молекул:

$$\beta = n' / nt.$$

Эта величина имеет размерность

$$\dim \beta = T^{-1},$$

ее единица — секунда в минус первой степени.

**Молярная концентрация** некоторого компонента  $B$  — отношение количества вещества этого компонента к объему раствора:

$$C_B = N_B / V.$$

Молярная концентрация имеет размерность

$$\dim C_B = L^{-3} N$$

и выражается в молях на кубический метр.

**Подвижность носителей заряда** — отношение направленной скорости носителей заряда (ионов, электронов и др.), обусловленной электрическим полем, к напряженности этого поля:

$$b = v / E.$$

Имеет размерность

$$\dim b = M^{-1} T^2 I$$

и выражается в квадратных метрах на вольт-секунду.

**Ионный эквивалент концентрации** — отношение молярной концентрации к степени окисления:

$$C_v = C_B / v.$$

Поскольку степень окисления  $v$  — величина безразмерная, ионный эквивалент концентрации имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и молярная концентрация.

**Молярная электрическая проводимость** — отношение удельной электрической проводимости к молярной концентрации:

$$\Lambda_m = \sigma / C_B.$$

Имеет размерность

$$\dim \Lambda_m = M^{-1} T^3 I^2 N^{-1}$$

и выражается в сименс-квадратных метрах на моль.

Эквивалентная электрическая проводимость — отношение удельной проводимости к ионному эквиваленту концентрации:

$$\Lambda = \sigma / C_v = \nu \Lambda_m.$$

Обладает той же размерностью и выражается в тех же единицах, что и молярная электрическая проводимость.

Электрохимический эквивалент — отношение массы вещества, отложившегося на электроде, к электрическому заряду, протекшему через электролит:

$$k = m/q.$$

Выражается в килограммах на кулон и имеет размерность

$$\dim k = MT^{-1} I^{-1}.$$

Приведем ряд величин и их единиц, необходимых для описания термоэлектрических явлений.

Температурный коэффициент сопротивления — логарифмическая производная электрического сопротивления по температуре

$$\text{TK } R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{d}{dT} \ln \{R\}.$$

Выражается в кельвинах в минус первой степени и имеет размерность  $\Theta^{-1}$ .

Коэффициент термоэлектродвижущей силы (постоянная термопары) — отношение возникающей термоэлектродвижущей силы к разности температур между спаями:

$$\alpha_T = \mathcal{E} / \Delta T.$$

Выражается в вольтах на кельвин и имеет размерность

$$\dim \alpha_T = L^2 MT^{-3} I^{-1} \Theta^{-1}.$$

Коэффициент Пельтье равен отношению количества теплоты, выделившейся или поглощенной в спаях термопары, к прошедшему через спай электрическому заряду:

$$\Pi = Q/q.$$

Выражается в джоулях на кулон и имеет размерность

$$\dim \Pi = L^2 MT^{-3} I^{-1}.$$

Коэффициент Томсона — отношение теплоты Томсона, выделяющейся на участке электрической цепи, к прошедшему заряду и разности температур на концах участка:

$$\sigma = Q/(q\Delta T).$$

Выражается в вольтах на кельвин и имеет ту же размерность, что и коэффициент термоэлектродвижущей силы  $\alpha_T$ .

### 13. ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

В области тепловых явлений к единицам длины, массы и времени в качестве четвертой основной единицы добавляется единица термодинамической температуры — кельвин, а в молекулярной физике, кроме того, и единица количества вещества — моль (табл. П4).

Количество теплоты и термодинамические потенциалы. Энергия

и работа в тепловых явлениях имеют название количества теплоты  $Q$ , а также теплоты фазового превращения, теплоты сгорания, теплоты химической реакции, наконец, название того или иного из термодинамических потенциалов. Все эти величины измеряются в джоулях и имеют размерность

$$L^2 MT^{-2}.$$

К термодинамическим потенциалам относятся внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ , изохорно-изотермический потенциал  $F$ , изобарно-изотермический потенциал  $G$ . Эти потенциалы связаны друг с другом соотношениями

$$F = U - TS; \quad H = U + pV; \quad G = F + pV$$

и являются функциями термодинамической температуры  $T$ , объема  $V$ , давления  $p$ , энтропии  $S$ .

Удельное количество теплоты — отношение количества теплоты к массе системы. Имеет размерность  $L^2 T^{-2}$  и выражается в джоулях на килограмм.

Джоуль на килограмм равен удельному количеству теплоты системы, в которой веществу массой 1 кг сообщается (или отбирается от него) количество теплоты 1 Дж.

Теплоемкость — отношение сообщенного системе количества теплоты  $dQ$  к вызванному возрастанию температуры  $dT$ :

$$C = dQ/dT.$$

Теплоемкость выражается в джоулях на кельвин и имеет размерность

$$\dim C = L^2 MT^{-2} \Theta^{-1}.$$

Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж.

Удельная теплоемкость есть отношение теплоемкости к массе вещества:

$$c = C/m.$$

Имеет размерность

$$\dim c = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

и выражается в джоулях на килограмм-кельвин.

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.

Энтропия — мера необратимого рассеяния энергии, функция состояния системы. Изменение энтропии выражается интегралом

$$\Delta S = \int \delta Q/T.$$

Имеет ту же размерность, что и теплоемкость, и выражается в джоулях на кельвин.

Джоуль на кельвин равен изменению энтропии системы, которой при температуре  $n$  К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты  $n$  Дж.

Удельная энтропия — отношение энтропии к массе вещества:

$$s = S/m.$$

Обладает той же размерностью, что и удельная теплоемкость, и выражается в джоулях на килограмм-кельвин.

Джоуль на килограмм-кельвин равен изменению удельной энтропии вещества, в котором при массе 1 кг изменение энтропии составляет 1 Дж/К.

Молярная теплоемкость — отношение количества теплоты, сообщенной веществу, к возрастанию его температуры и количеству этого вещества. Имеет размерность

$$L^2 MT^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$$

и выражается в джоулях на моль-кельвин.

Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, 1 моль которого имеет теплоемкость 1 Дж/К.

Тепловой поток, плотность теплового потока — частные виды потока энергии и его плотности, относящиеся к переносу теплоты. Имеют соответственно размерность

$$L^2 MT^{-3}, \quad MT^{-3}$$

и выражаются в ваттах и ваттах на квадратный метр.

Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока 1 Вт, равномерно распределенного по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплообмена (теплоотдачи, теплопередачи) есть отношение плотности теплового потока к перепаду температуры. Имеет размерность

$$MT^{-3} \Theta^{-1}$$

и выражается в ваттах на квадратный метр-кельвин.

Ватт на квадратный метр-кельвин равен коэффициенту теплообмена, соответствующему поверхностной плотности теплового потока 1 Вт/м<sup>2</sup> при разности температур 1 К.

Градиент температуры

$$\text{grad } T = dT/ds$$

имеет размерность  $L^{-1}\Theta$  и выражается в кельвинах на метр.

Кельвин на метр равен градиенту температуры, при котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К.

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) вещества есть отношение плотности теплового потока к градиенту температуры:

$$\lambda = \frac{Q}{St (dT/ds)}$$

Теплопроводность выражается в ваттах на метр-кельвин и обладает размерностью

$$\dim \lambda = LMT^{-3} \Theta^{-1}.$$

Ватт на метр-кельвин равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока 1 Вт/м<sup>2</sup> устанавливается градиент температуры 1 К/м.

Объемная теплоемкость — отношение теплоемкости к объему вещества. Равна произведению удельной теплоемкости на плотность вещества, для газов — произведению удельной теплоемкости при постоянном давлении  $c_p$  на плотность  $\rho$ . Имеет размерность

$$L^{-1} MT^{-2} \Theta^{-1}$$

и выражается в джоулях на кубический метр-кельвин.

Джоуль на кубический метр-кельвин равен объемной теплоемкости вещества, имеющего при объеме  $1 \text{ м}^3$  теплоемкость  $1 \text{ Дж/К}$ .

Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) — отношение теплопроводности к объемной теплоемкости, т. е. к произведению удельной теплоемкости на плотность вещества:

$$a = \lambda / (c_p \rho).$$

Характеризует скорость выравнивания температуры в среде при нестационарной теплопроводности. Имеет размерность

$$\dim a = L^2 T^{-1}$$

и выражается в квадратных метрах на секунду. Размерность температуропроводности такая же, как и у кинематической вязкости и коэффициента диффузии (см. § 11).

Квадратный метр на секунду равен температуропроводности вещества с теплопроводностью  $1 \text{ Вт/(м·К)}$ , удельной теплоемкостью при постоянном давлении  $1 \text{ Дж/(кг·К)}$  и плотностью  $1 \text{ кг/м}^3$ .

Температурный коэффициент (ТК) зависящей от температуры физической величины  $Z$  есть логарифмическая производная этой величины по температуре

$$\text{ТК } Z = \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dT} = \frac{d}{dT} \ln \{Z\}.$$

ТК имеет размерность  $\Theta^{-1}$  и выражается в кельвинах в минус первой степени ( $\text{К}^{-1}$ ).

ТК электрического сопротивления ( $Z=R$ ) уже был рассмотрен выше (с. 43). Широко применяются температурные коэффициенты длины (линейного размера) и объема тела из определенного вещества, а также температурный коэффициент давления

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \frac{d}{dT} \ln \{l\}; \quad \beta = \frac{d}{dT} \ln \{V\}; \quad \text{ТК } p = \frac{d}{dT} \ln \{p\}.$$

Для изотропного вещества  $\beta = 3\alpha$ .

Молярная масса — отношение массы системы к количеству вещества в ней:

$$M = m/\nu.$$

Имеет размерность  $MN^{-1}$  и выражается в килограммах на моль.

Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.

Молярный объем — отношение объема вещества к количеству этого вещества:

$$V_v = V/\nu.$$

Имеет размерность  $L^3N^{-1}$  и выражается в кубических метрах на моль.

Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем  $1 \text{ м}^3$ .

Концентрация молекул — отношение числа молекул в системе к ее объему:

$$n = N/V.$$

Имеет размерность

$$\dim n = L^{-3}$$

и выражается в метрах в минус третьей степени.

**Постоянная Авогадро** — отношение числа молекул к количеству вещества:

$$N_A = N/\nu.$$

Имеет размерность

$$\dim N_A = N^{-1}$$

и выражается в молях в минус первой степени.

**Универсальная (молярная) газовая постоянная** — отношение работы  $dW$ , совершаемой идеальным газом при его изобарическом нагревании, к количеству его вещества  $\nu$  и интервалу температур  $dT$ :

$$R = dW/(\nu dT).$$

Имеет размерность

$$\dim R = L^2 MT^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$$

и выражается в джоулях на моль-кельвин.

**Удельная газовая постоянная** — отношение работы  $dW$ , совершаемой идеальным газом при его изобарическом нагревании, к массе  $m$  этого газа и интервалу температур  $dT$ , т. е. отношение универсальной газовой постоянной к молярной массе  $M$  вещества:

$$B = dW/(m dT) = R/M.$$

Имеет размерность

$$\dim B = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

и выражается в джоулях на килограмм-кельвин.

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной газовой постоянной идеального газа массой 1 кг, совершающего при повышении температуры на 1 К и при постоянном давлении работу 1 Дж.

**Молярная внутренняя энергия** — отношение внутренней энергии к количеству вещества. Выражается в джоулях на моль.

Джоуль на моль равен молярной внутренней энергии вещества в количестве 1 моль, внутренняя энергия которого равна 1 Дж.

#### 14. АКУСТИКА. ГРОМКОСТЬ И ВЫСОТА ЗВУКА

Звуковые волны, распространяющиеся в воздухе или другой упругой среде, характеризуются скоростью распространения, интенсивностью, частотой и рядом других физических величин. Для образования единиц акустики, как и механики, достаточно трех основных единиц — длины, массы и времени. Производные единицы акустики приведены в табл. П5, а логарифмические единицы, необходимые для характеристики громкости и высоты звука, — в табл. П9, П10.

Любой звук может быть разложен в спектр простых гармонических синусоидальных волн, каждая из которых имеет свои частоту колебаний и амплитуду. Спектральный состав является важной характеристикой звука.

Скорость распространения обычно одинакова для всех составляющих звука. Скорость звука в воздухе при температуре 0 °С и дав-

лении 101 325 Па (1 атм) равна 331 м/с. С ростом температуры на каждый градус Цельсия скорость эта возрастает приблизительно на 0,17 %.

Звуковое давление  $p_0$ , которым характеризуют амплитуду звука, как и всякое давление, измеряется в паскалях и имеет размерность  $L^{-1}MT^{-2}$ .

Звуковая энергия  $W$ , плотность звуковой энергии  $w = dW/dV$ , звуковая мощность  $P = dW/dt$ , поток звуковой энергии  $P = dW/dt$  и интенсивность звука, т. е. плотность потока звуковой энергии  $I = dP/dS$  — все эти энергетические величины, относящиеся к звуку, измеряются в тех же единицах и имеют те же размерности, что и в механике и других областях (см. табл. П5). Интенсивность звука иногда называют силой звука.

Колебательной скоростью называют амплитуду скорости, с которой движутся по отношению к среде в целом частицы (бесконечно малые части среды), колеблющиеся около положений равновесия при прохождении звуковой волны. Колебательная скорость равна произведению амплитуды колебаний частиц среды на угловую частоту колебаний:

$$v = A\omega.$$

Колебательная скорость во много раз меньше скорости распространения звука, изменяется по поперечному сечению звукового канала и различна для каждой из спектральных составляющих звука.

Имеет размерность скорости и выражается в м/с.

Объемная колебательная скорость звука есть произведение его колебательной скорости, усредненной по площади поперечного сечения звукового канала, на эту площадь:

$$V_1 = vS.$$

Объемная скорость имеет размерность  $L^3T^{-1}$  и выражается в кубических метрах на секунду.

Кубический метр на секунду равен объемной скорости звука при колебательной скорости 1 м/с и площади поперечного сечения канала 1 м<sup>2</sup>.

Акустическое сопротивление — физическая величина, аналогичная сопротивлению электрической цепи. Акустическое сопротивление равно отношению амплитуды звукового давления к возникающей объемной колебательной скорости звука:

$$Z_a = p_0/V_1.$$

Имеет размерность

$$\dim Z_a = L^{-4} MT^{-1}$$

и выражается в паскаль-секундах на кубический метр.

Паскаль-секунда на кубический метр равна акустическому сопротивлению канала, в котором создается объемная скорость 1 м<sup>3</sup>/с при звуковом давлении 1 Па.

Удельное акустическое сопротивление есть отношение амплитуды звукового давления к колебательной скорости в данной точке, в среднем равное произведению акустического сопротивления звукового канала на площадь его поперечного сечения:

$$z_a = \frac{p_0}{v} \approx Z_a S.$$



Имеет размерность

$$\dim z_a = L^{-2} MT^{-1}$$

и выражается в паскаль-секундах на метр.

Паскаль-секунда на метр есть удельное акустическое сопротивление канала площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ , имеющего акустическое сопротивление  $1 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ .

Механическое сопротивление — отношение силы, с которой акустическая система действует на среду, к колебательной скорости, усредненной по сечению звукового канала:

$$Z_M = \frac{F}{\langle v \rangle} = Z_a S^2.$$

Имеет размерность

$$\dim Z_M = MT^{-1}$$

и выражается в ньютон-секундах на метр.

Ньютон-секунда на метр равна механическому сопротивлению канала, в котором при силе  $1 \text{ Н}$  возникает колебательная скорость  $1 \text{ м}/\text{с}$ .

Ряд величин и их единиц служат для характеристики акустических свойств помещений.

Акустический коэффициент отражения  $\alpha$  есть отношение отражаемой звуковой энергии ко всей падающей энергии; акустический коэффициент поглощения  $\beta$  — отношение поглощаемой энергии к падающей. Эти безразмерные коэффициенты в сумме дают единицу:

$$\alpha + \beta = 1.$$

Акустическая проницаемость перегородки  $d$  — отношение проходящей через перегородку звуковой энергии к падающей на нее энергии. Также величина безразмерная.

Поглощение звука в среде описывается экспоненциальной функцией

$$I = I_0 \exp(-\delta x),$$

в которой коэффициент  $\delta$  называется линейным показателем поглощения. Он имеет размерность  $L^{-1}$  и измеряется в метрах в минус первой степени. На расстоянии  $x=1/\delta$  интенсивность звука  $I$  уменьшается в  $e$  раз.

Общее звуковое поглощение есть произведение коэффициента поглощения на площадь тела. Измеряется площадью абсолютно поглощающего тела, имеющего такое же поглощение. Поэтому за единицу общего звукового поглощения принимают квадратный метр открытого окна — открытое окно практически не отражает звука.

Затухание звука выражается в спадании плотности звуковой энергии со временем по экспоненциальному закону

$$\omega = \omega_0 \exp(-t/\tau).$$

Здесь  $\tau$  — время, за которое плотность звуковой энергии уменьшается в  $e$  раз. На практике применяют другую величину — так называемое время стандартной реверберации

$$T_p = 2,3 \cdot 6\tau = 13,8\tau,$$

за которое плотность звуковой энергии падает в  $10^6$  раз, т.е. на 60 дБ (см. ниже).

**Субъективное восприятие звука.** Музыкальные звуки состоят из одной преобладающей гармонической составляющей некоторой частоты и ряда составляющих, частоты которых кратны частоте основной составляющей, а амплитуды существенно меньше. Помимо интенсивности музыкального звука, воспринимаемой как его громкость, человек воспринимает и частоту основной гармоник, ощущаемую как высоту музыкального тона, а также и составляющие более высоких кратных частот (высшие гармоники), ощущаемые как специфическая окраска (тембр) звука.

Такие звуки, как стук, треск, грохот, шелест и т. п., представляют спектр составляющих с частотами, непрерывно распределенными в широком диапазоне. Эти звуки называют шумами. Человек воспринимает лишь их громкость, т. е. суммарную интенсивность.

Область воспринимаемых звуковых волн ограничена чувствительностью человеческого уха и порогом ощущения боли. Оба ограничения зависят от частоты звука. На плоскости частота — амплитуда давления они изображаются некоторыми кривыми, причем обычно по обеим осям используется логарифмический масштаб (рис. 2).

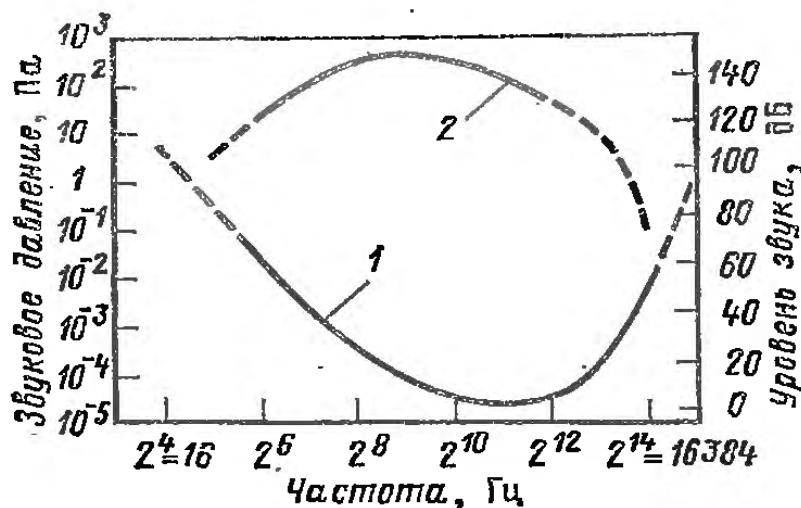


Рис. 2. Область слышимости:

1 — порог чувствительности уха; 2 — порог ощущения боли.

Восприятие звука субъективно, у разных людей оно не вполне одинаково, и поэтому приводятся усредненные данные. Области восприятия звука у животных и других живых существ могут быть заметно иными.

Как видно из рис. 2, человек ощущает звуки с частотой приблизительно от 16 до 20 000 Гц. Волны с частотой ниже 16 Гц называют инфразвуком, выше 20 000 Гц — ультразвуком, а в интервале от  $10^9$  до  $10^{13}$  Гц — гиперзвуком. Диапазон воспринимаемых амплитуд звукового давления простирается примерно от  $3 \cdot 10^{-5}$  до 400 Па.

**Необходимость логарифмических единиц.** Относительные размеры области слышимых звуков, как видно из приведенных данных, составляют по частоте около 1250 и по амплитуде звукового давления — более  $10^7$ . Человеческое ухо улавливает тишайший шелест листьев, и оно же выдерживает сотрясающие удары грома. Человек может различать музыкальные тона более чем восьми октав.

Эта человеческая способность воспринимать звук в весьма широких пределах объясняется действием известного психофизического закона Вебера — Фехнера. Сформулированный путем обобщения большого экспериментального материала, закон этот гласит, что ощущение пропорционально логарифму раздражения.

Если воздействие возрастает в 10 раз, его десятичный логарифм увеличивается на единицу, и ощущение возрастает также на некоторую единицу. А при росте воздействия в миллион раз его логарифм, а вместе с тем и ощущение возрастают всего лишь на шесть тех же единиц.

Психофизический закон обуславливает изменение амплитуды и частоты воспринимаемых звуков в столь широких пределах, что использовать линейные шкалы практически невозможно и необходимо прибегать к логарифмическому масштабу. Но тот же закон делает применение логарифмических величин и их единиц вполне естественным.

Передача звуковых сигналов на большие расстояния осуществляется посредством преобразования их в электрические колебания или радиоволны с последующим преобразованием обратно в звук. Поэтому в одних и тех же логарифмических единицах измеряется усиление (или ослабление, затухание) как звука, так и электрических или радиосигналов.

Громкость звука характеризуется логарифмом его интенсивности, т. е. плотности потока звуковой энергии, или удвоенным логарифмом звукового давления.

Усиление интенсивности звука измеряют в белах. Бел (Б) есть возрастание интенсивности или другой энергетической величины в 10 раз. Поскольку энергетические величины пропорциональны квадратам силовых величин (звукового давления, электрического тока и т. п.), бел представляет также возрастание силовой величины в  $\sqrt{10}=3,162$  раза.

Единица в 10 раз меньшая — децибел (дБ) — есть возрастание энергетической величины в  $\sqrt[10]{10}=1,259$  раза или силовой величины в  $\sqrt[20]{10}=1,121$  раза.

В прошлом применялась также единица с названием децилог (длог), равная возрастанию в  $\sqrt[10]{10}=1,259$  раза любой величины, безотносительно к тому, энергетическая она или силовая. Для энергетических величин 1 длог = 1 дБ, для силовых величин 1 длог = 2 дБ. Применялся также непер (Нп), равный возрастанию энергетической величины в  $e^2=7,389$  раза или силовой величины в  $e=2,718$  раза; 1 Нп = 0,8686 Б.

Относительный уровень звука есть превышение его уровня над некоторым уровнем, условно принятым за начало отсчета. Относительный уровень обозначают буквой  $L$ , например  $L_p$  — уровень давления. В качестве исходных уровней принимают следующие:

Уровень звукового давления	20 мкПа,
Уровень звуковой мощности	$10^{-12}$ Вт
Уровень интенсивности звука	$10^{-12}$ Вт/м <sup>2</sup> .

При необходимости указать исходный уровень его помещают в скобках после буквы (начальные буквы слова *reference*), например  $L_p$  (*re* 20 мкПа) = 15 дБ.

Рассмотренные единицы громкости в сущности относятся к звукам определенной частоты (чистым музыкальным тонам) или, во всяком случае, к звукам с одной преобладающей гармоникой. Характеризовать громкость шумов значительно сложнее. Различные составляющие шума при одном и том же звуковом давлении вызы-

вают в зависимости от их частоты звуковое ощущение различной громкости. Для характеристики субъективного восприятия громкости шума введена специальная единица, носящая название фон.

**Фон** есть уровень громкости, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука стандартного чистого тона (с частотой 1000 Гц) равен 1 дБ. Для звука стандартного тона уровень громкости в фонах совпадает с уровнем звукового давления в децибелах.

**Высота звука и музыкальные интервалы.** Перейдем к особенностям восприятия музыкальных звуков и чередованию музыкальных тонов. Слово тон здесь употреблено, как и ранее, в его первом значении, в смысле высоты звука, однозначно связанной с частотой звуковых волн.

Два тона воспринимаются как различные, если разность их частот составляет не менее 2—3 %. Интервалы высоты звука в различных диапазонах воспринимаются как равные, если равны отношения их крайних частот.

Но наиболее важная особенность заключается в том, что два тона, частоты которых различаются в 2 раза, воспринимаются как одинаковые, хотя и принадлежащие по своей высоте к различным музыкальным диапазонам. Это фундаментальное свойство человеческого восприятия звуков обуславливает деление всего диапазона звуковых частот на ряд равных интервалов — октав. Октава есть музыкальный интервал с отношением верхней и нижней частот, равным двум.

**Гамма.** Чередование музыкальных тонов внутри октавы периодически повторяется от октавы к октаве. В музыкальных произведениях используют лишь определенные тона, расположенные на определенных интервалах внутри каждой октавы. Последовательность тонов в октаве называется гаммой. В гамме семь тонов (нот), начиная от тона до и кончая си, следующих в порядке возрастания частоты. Далее идет тон до следующей октавы, и все повторяется. Семи указанным нотам соответствуют белые клавиши рояля и определенные места в нотной записи (рис. 3).

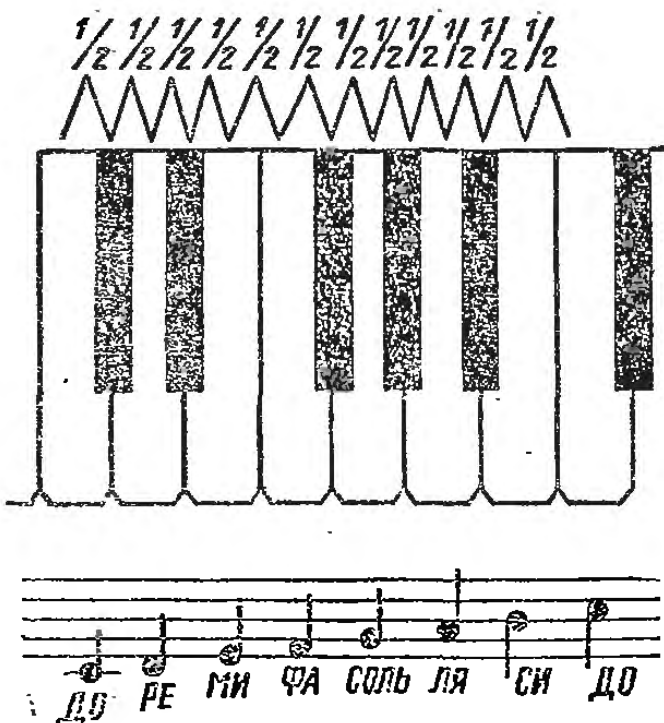


Рис. 3. Клавиатура рояля и обозначение нот в пределах одной октавы

Однако интервалы между семью нотами не одинаковы. Октава делится не на семь, а на двенадцать равных или приблизительно равных частей, называемых полутонами. Интервал вдвое больший, т. е. шестую или приблизительно шестую часть октавы, называют тоном. Таково второе значение слова тон.

Интервалы между нотами ми и фа, си и до равны только полутону, интервалы между другими соседними (смежными) нотами равны целому тону. Для восстановления равномерности распределения музыкальных тонов в клавиатуре имеется наряду с семью белыми клавишами еще и по пять черных клавиш на каждую октаву.

Звуки, соответствующие черным клавишам, не имеют собственных названий и собственных мест в нотной записи. Для них используется название предыдущей «белой» ноты с добавлением слова диез, означающего повышение звука на полтона, или название последующей «белой» ноты со словом бемоль, означающим понижение на полтона. В нотной записи также используются обозначения предыдущей или последующей «белых» нот с добавлением знака повышения (диез) или понижения (бемоль) на полтона.

Таким образом, двенадцати клавишам октавы, семи белым и пяти черным, соответствуют звуки

до, до диез, ре, ре диез, ми, фа, фа диез, соль, соль диез, ля, ля диез, си

следующие один за другим с повышением на полтона.

**Хроматический строй.** Для получения гармонических музыкальных созвучий требуется, чтобы частоты соседних тонов (нот) относились одна к другой как последовательные небольшие целые числа. Гамма, в которой выдержано это условие, называется чистой или натуральной гаммой (или чистым строем). Как видно из табл. П10, интервалы между соседними тонами чистой гаммы лишь приблизительно равны шестой или двенадцатой части октавы.

В музыкальных композициях для перехода из одной тональности в другую необходимо, чтобы, начиная с любого тона, можно было образовать гамму с такими отношениями частот последовательных ступеней, как и в основной гамме. Но для этого октава должна быть разделена на двенадцать в точности равных частей, т. е. отношения частот соседних звуков должны быть все одинаковы

и равны  $\sqrt[12]{2} = 1,0594\dots$

Согласовать это требование с условием, чтобы частоты соседних тонов относились как небольшие целые числа, невозможно, так как число  $\sqrt[12]{2}$  иррационально, оно не равно отношению целых чисел. Впрочем, совершенно точного согласования и не требуется. Если различие частот двух звуков не превышает долей процента, человек его не замечает.

Указанные соображения привели к установлению так называемого «хорошо темперированного» строя, или хроматической гаммы, в которой интервалы между соседними полутонами в точности равны одной двенадцатой части октавы. Эти интервалы, как уже говорилось, также называют полутонами. Существующая система нотной записи, основанная на семи неодинаково отстоящих нотах, мало приспособлена к хроматической гамме. Различие в звучании тонов чистой и темперированной гамм, впрочем, не очень заметно.

В соответствии с хроматической гаммой введена такая единица музыкальных интервалов, как цент — интервал, в 1200 раз меньший

октавы. Интервал между соседними полутонами в темперированной гамме равен в точности 100 центам, интервал между соседними тонами, т. е. тон, равен 200 центам.

Существует и другая логарифмическая единица частотного интервала — савар, интервал с отношением крайних частот, равным  $1000^{\sqrt{-}}$

$\sqrt[1000]{10} = 1,0023$ . Эта единица в применении к музыкальным интервалам не столь удобна, как цент.

Музыкальные интервалы, отделяющие тон до и каждую из последующих семи нот, несут специальные названия, приведенные в табл. П10.

Для полного определения любой гаммы необходимо зафиксировать частоту какого-либо из ее тонов. В качестве основного был выбран тон ля первой октавы. Международный конгресс в Вене в 1885 г. для этого тона установил частоту 435 Гц. Согласно ОСТ/НКС 7710 частота того же тона должна быть равна 440 Гц.

## 15. СВЕТ И ЕГО ВОСПРИЯТИЕ

Человеческий глаз воспринимает электромагнитные излучения в сравнительно узкой полосе длин волн — примерно от 0,40 до 0,76 мкм. Видимый свет в зависимости от длины волны вызывает ощущение того или иного цвета — от фиолетового до красного. Свет с длиной волны менее 0,40 мкм называют ультрафиолетовым излучением, с длиной волны более 0,76 мкм — инфракрасным (тепловым) излучением. Ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения относятся к так называемому оптическому диапазону, занимающему область длин волн от нескольких нанометров до десятых долей миллиметра (рис. 4).

Видимый свет, как и вообще электромагнитное излучение, характеризуют рядом объективных энергетических величин. К ним относятся энергия излучения и ее объемная плотность

$$W; \quad w = W/V,$$

поток излучения и его плотность (интенсивность излучения)

$$\Phi_e = W/t; \quad \varphi = \Phi_e/S.$$

Размерность и единицы этих величин, разумеется, такие же, как и у энергии любой другой физической природы, у плотности энергии, потока энергии, плотности потока энергии (см. § 11 и табл. П6).

Кроме того, используются такие характеристики, как энергетическая сила света (сила излучения), равная отношению потока излучения к телесному углу, и энергетическая яркость (лучистость) — отношение энергетической силы света к площади поверхности источника:

$$I_e = \Phi_e/\omega, \quad B_e = I_e/S.$$

Эти величины выражаются в ваттах на стерадиан и ваттах на стерадиан-квдратный метр. Они имеют размерность потока энергии  $L^2MT^{-3}$  и плотности потока энергии  $MT^{-3}$  соответственно.

Энергетическая светимость (излучательность) и энергетическая освещенность (облученность) есть отношения потока излучения к площади поверхности источника света и к площади освещаемой поверхности:  $R_e = \Phi_e/S$  и  $E_e = \Phi_e/S$ . Обе эти величины имеют размерность

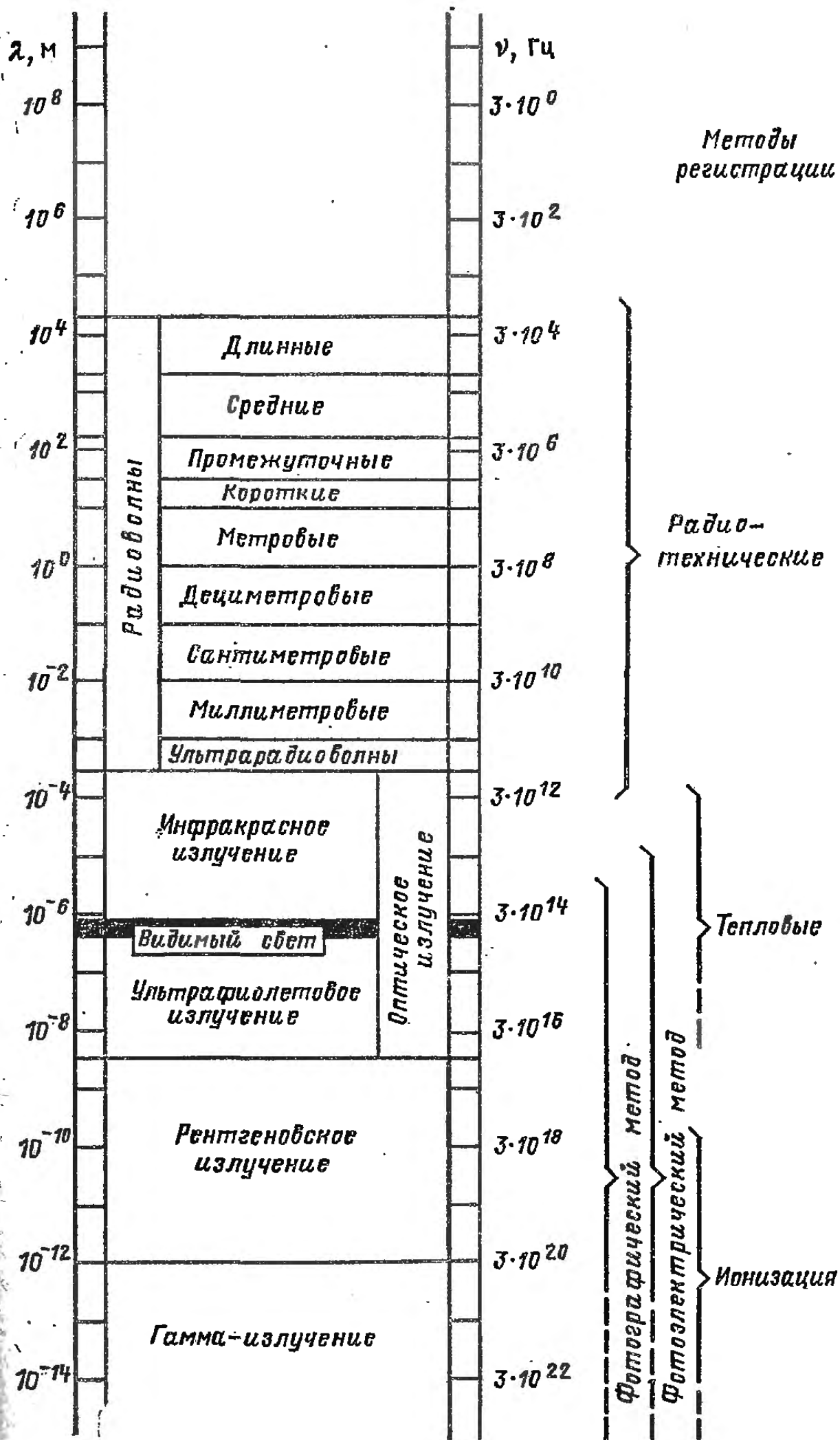


Рис. 4. Шкала электромагнитных излучений

плотности потока энергии  $MT^{-3}$  и выражаются в ваттах на квадратный метр.

Энергетической экспозицией (лучистой экспозицией) называют произведение энергетической освещенности на время облучения  $H_e = E_e t$ . Эта величина имеет размерность  $MT^{-2}$  и выражается в джоулях на квадратный метр.

Особенности единиц света и его восприятия. Приведенных объективных характеристик недостаточно для того, чтобы выразить воздействие света на человеческий глаз. Восприятие света человеком основано на его физиологическом действии. Так, человек слеп по отношению к свету с длинами волн вне довольно узкого диапазона. Видимый свет разной длины волны при одинаковых энергетических характеристиках вызывает не только различное цветовое ощущение, но и ощущение различной интенсивности света.

На рис. 5 приведена кривая чувствительности глаза в зависимости от длины волны света. Как можно видеть, наибольшее воздей-

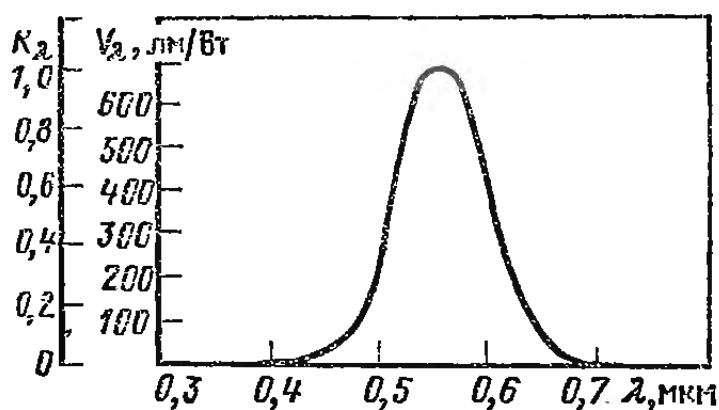


Рис. 5. Эффективность восприятия света человеком (видность) при различных длинах волн

ствие оказывает свет в зеленой части спектра при длине волны 555 нм. Разумеется, восприятие света, как и звука, субъективно и у разных людей различно. Поэтому исходят из средней чувствительности глаза, установленной путем обследования большого числа людей с нормальным зрением. Кстати, некоторые живые существа воспринимают свет в несколько ином диапазоне частот, чем человек.

Таким образом, ввиду невозможности удовлетвориться энергетическими характеристиками света для оценки и сравнения различных источников света по их восприятию человеком оказалось необходимым ввести ряд специальных световых величин, рассмотренных ниже.

**Сила света.** В Международной системе единиц сила света входит в число основных величин, ее размерность обозначается символом  $I$ .

Определение единицы силы света, канделы, как и других основных единиц СИ, приведено в табл. П1. Размер и размерность производных световых единиц устанавливаются по их определяющим уравнениям (табл. П6).

**Световой поток.** При источнике с силой света  $I$  в телесный угол  $\omega$  попадает световой поток  $\Phi = I\omega$ . Следовательно, размерность светового потока совпадает с размерностью силы света  $I$ , а единица светового потока есть кандела-стерадиан. Этой единице присвоено название люмен (лм).

Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.



**Световая энергия.** Она определяется как произведение светового потока на время  $Q = \Phi t$  и имеет размерность  $TJ$ . Световая энергия выражается в люмен-секундах.

**Светимость и освещенность.** Отношение светового потока к площади поверхности источника называют его светимостью:  $R = \Phi/S$ . А отношение светового потока к площади освещенной поверхности называют освещенностью:  $E = \Phi/S$ . Обе эти величины имеют одну и ту же размерность  $L^{-2}J$ .

Светимость выражается в люменах на квадратный метр. Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ , испускающей световой поток  $1 \text{ лм}$ .

Единица освещенности, также равная люмену на квадратный метр, носит название люкс (лк). Люкс равен освещенности поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  при падающем на нее световом потоке  $1 \text{ лм}$ .

**Световая экспозиция.** Произведение освещенности на время есть световая экспозиция:  $H = Et$ . Размерность ее  $L^{-2}TJ$ , единица — люкс-секунда. Люкс-секунда равна световой экспозиции, создаваемой за время  $1 \text{ с}$  при освещенности  $1 \text{ лк}$ .

**Видность излучения.** Важной величиной является отношение светового потока к потоку излучения

$$K = \Phi/\Phi_e.$$

Эта величина называется видностью излучения, или световым эквивалентом потока излучения. Она имеет размерность  $L^{-2}M^{-1}T^3J$  и выражается в люменах на ватт. Видность излучения есть величина, связывающая физиологическое воздействие света и его энергетическую характеристику как физического явления.

Поскольку восприятие света зависит от длины волны, различают полную и спектральную (монохроматическую) видность. Полная видность — это отношение полного светового потока белого или другого смешанного света к соответствующему потоку лучистой энергии. Спектральная видность или спектральная световая эффективность — отношение светового потока к потоку лучистой энергии для света одной определенной длины волны  $\lambda$ :

$$K_\lambda = \Phi_\lambda / \Phi_e.$$

Показательна также так называемая относительная видность  $V = K_\lambda / K_{\text{max}}$ , т. е. отношение спектральной видности к ее значению при длине волны  $\lambda = 555 \text{ нм}$ , где видность максимальна ( $K_\lambda = K_{\text{max}}$ ) (см. рис. 5).

Важное значение имеют и спектральные характеристики энергетических величин, перечисленных в начале этого параграфа, т. е. плотности их распределения по длинам волн или частотам. Так, спектральные плотности излучательности и облученности

$$R_{e\lambda} = dR_e/d\lambda; \quad E_{e\lambda} = dE_e/d\lambda$$

имеют размерность  $L^{-1}MT^{-3}$  и выражаются в ваттах на метр в третьей степени.

Чувствительность человеческого глаза весьма значительна, и вместе с тем он может выдерживать довольно интенсивный свет. Человек различает невооруженным глазом очень слабые звезды, но не слепнет и от яркого блеска песка под палящим южным солнцем. Эта способность человека воспринимать широкий диапазон интенсивностей света, как и громкости звука, объясняется уже упоминавшимся

законом Вебера — Фехнера — ощущение пропорционально логарифму раздражения.

Кстати, яркость звезд и других небесных светил выражается в логарифмических единицах. Яркостью или блеском светила называют создаваемую им освещенность. Еще в древности звезды, видимые невооруженным глазом, были разбиты по своему блеску на шесть величин. Самые яркие отнесли к звездам первой величины, самые слабые — к звездам шестой величины. В 1856 г. отношение блеска двух звезд при разности в пять звездных величин было принято равным 100. При этом десятичный логарифм отношения освещенностей, соответствующий разности в одну звездную величину, равен  $2:5=0,4$ , а само отношение освещенностей составляет 2,512. Эта шкала была распространена и на более яркие светила, и на звезды слабее шестой величины. Звездные величины отсчитываются от условного уровня, равного освещенности в  $4,88 \cdot 10^{-6}$  лк.

К светилам отрицательной звездной величины относятся Сириус ( $-1,4$ ), Венера ( $-4,4$ ), Луна ( $-12,6$ ), Солнце ( $-26,8$ ).

В геометрической и волновой оптике рассматривают физические величины, являющиеся геометрическими или относительными величинами. Их единицы не нуждаются в подробных пояснениях.

Длина волны  $\lambda$ , фокусное расстояние линзы  $f$ , оптическая длина пути  $L$  имеют размерность длины  $L$  и выражаются в метрах.

Волновое число  $k=2\pi/\lambda$  и оптическая сила линзы  $\Phi=1/f$  имеют размерность  $L^{-1}$  и выражаются в метрах в минус первой степени. Ту же размерность имеют и в тех же единицах выражаются дисперсия показателя преломления

$$d = \Delta n / \Delta \lambda$$

и линейный показатель поглощения (коэффициент поглощения)  $a$ , входящий в закон поглощения излучения веществом,

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-ax).$$

К относительным величинам принадлежат показатель (коэффициент) преломления  $n=c/v$ , линейное (поперечное) увеличение  $\beta$ , продольное увеличение  $\alpha$  (увеличение отрезков, расположенных вдоль оптической оси) и угловое увеличение

$$\gamma = \operatorname{tg} u' / \operatorname{tg} u,$$

где  $u$  и  $u'$  — углы, образуемые сопряженными лучами с оптической осью.

Безразмерными относительными величинами являются также коэффициенты отражения, рассеяния и пропускания  $\rho, \alpha, \tau$ .

Относительное отверстие объектива  $f_0=d/f$  есть также величина безразмерная ( $d$  — диаметр входного отверстия объектива,  $f$  — главное фокусное расстояние).

## 16. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Энергия связи частиц  $W_c$  выражается в джоулях. Энергия связи частиц в ядре составляет до  $1,3 \cdot 10^{-12}$  Дж/нуклон =  $8 \cdot 10^6$  эВ/нуклон. Энергия связи электрона в атоме водорода в основном состоянии равна 13,6 эВ.

Дефект массы атомного ядра выражается в килограммах:

$$\Delta m = W_c / c^2.$$

Распад радноуклида (радиоактивного изотопа) характеризуется уменьшением его массы  $m$  и активности  $A$  (см. ниже) по экспоненциальному закону

$$\frac{m}{m_0} = \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} = e^{-t/\tau} = 2^{-t/T_{1/2}}.$$

Коэффициент  $\lambda$  называют постоянной радиоактивного распада,  $\tau = 1/\lambda$  — средней продолжительностью жизни (временем жизни),  $T_{1/2} = 0,693 \tau$  — периодом полураспада радноуклида. Коэффициенты  $\tau$  и  $T_{1/2}$  имеют размерность времени,  $\lambda$  — размерность  $T^{-1}$ .

Постоянная радиоактивного распада равна отношению доли ядер  $dN/N$  радноуклида, распадающихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \ln N.$$

Средняя продолжительность жизни — время, в течение которого число ядер радноуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз.

Период полураспада — время, в течение которого число ядер радноуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза.

Понятие средней продолжительности жизни  $\tau$  употребляется и по отношению к отдельным микрообъектам, в частности к элементарным частицам. Значения всех этих величин имеют широкий разброс — от ничтожных долей секунды до тысяч лет.

Вероятность того или иного взаимодействия характеризуют сечением взаимодействия, которое имеет размерность площади  $L^2$ . В прошлом оно выражалось в барнах (б);  $1\text{б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ .

Приведем выражения и размерности некоторых физических постоянных атомной физики.

Постоянная тонкой структуры безразмерна и равна

$$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h} \approx \frac{1}{137}.$$

Классический радиус электрона, его комптоновская длина волны и радиус первой борвской орбиты выражаются равенствами

$$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}; \quad \lambda_C = \frac{h}{m_e c}; \quad a_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2},$$

имеют размерность длины и составляют соответственно

$$r_e = 2,818 \cdot 10^{-15} \text{ м}; \quad \lambda_C = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}; \quad a_1 = 5,292 \cdot 10^{-11} \text{ м}.$$

Постоянная Ридберга, являющаяся коэффициентом в формуле для частоты спектральных линий, равна

$$R_\infty = \frac{\pi m_e e^4}{8\epsilon_0^2 c h^3} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

При расчете энергетических уровней атома применяется единица энергии, называемая ридбергом,

$$Ry = ch R_\infty = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}.$$

Магнетон Бора, которому приблизительно равен собственный магнитный момент электрона, выражается равенством

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Гидромагнитное отношение — отношение магнитного момента к механическому — для орбитального движения и спина электрона составляет

$$\gamma = \frac{2\pi\mu_B}{h} = \frac{e}{2m_e}; \quad \gamma = \frac{4\pi\mu_B}{h} = \frac{e}{m_e}.$$

В ускорительной технике играют роль довольно специфические величины, относящиеся как к самим ускорителям, так и к пучкам ускоряемых частиц. Ввиду разнообразия ускорителей число характеризующих их параметров весьма значительно. Разнообразны и используемые единицы физических величин. Ниже приводятся лишь некоторые из них.

Входная и выходная энергия ускоряемых частиц выражается в электрон-вольтах. Электронные пушки ускоряют частицы до энергии порядка 1 МэВ, выходная энергия ряда работающих и сооружаемых ускорителей достигает фантастических значений — порядка  $10^{12}$  эВ.

Первеанс (полукубическая проводимость) — один из основных параметров электронных пушек. Первеанс есть отношение силы тока пушки к её анодному напряжению в степени три вторых:

$$S_g = I/U^{3/2}.$$

Целесообразность этого параметра обусловлена законом Ленгмюра — Чайлда («законом трех вторых»), согласно которому в каждой пушке с повышением анодного напряжения первеанс остается величиной постоянной. Первеанс выделяется среди других величин тем, что обладает размерностью с дробными показателями

$$\dim S_g = L^{-3} M^{-3/2} T^{3/2} I^{5/2}.$$

Разумеется, дробные показатели размерности в данном случае обусловлены самим определяющим уравнением.

Первеанс выражается в амперах на вольт в степени три вторых. На практике его выражают в микроамперах на вольт в степени три вторых, а числовое значение первеанса в этих единицах, равное  $10^6 \{S_g\}$ , называют микропервеансом. Обычно микропервеанс составляет несколько единиц, но в пушках специальной конструкции может быть и значительно больше.

Эмиссионная постоянная есть отношение плотности анодного тока насыщения к квадрату абсолютной температуры катода при нулевой работе выхода:

$$B = J_{\text{нас}}/T^2.$$

Имеет размерность

$$\dim B = L^{-2} I \Theta^{-2}$$

и выражается в амперах на квадратный метр-кельвин в квадрате.

Время ускорения есть интервал времени между моментом инжекции частицы и моментом окончания ее ускорения. Как и другие интервалы времени, выражается в секундах.

**Орбитальная частота** — частота обращения заряженных частиц в циклическом ускорителе. Ее размерность  $T^{-1}$ , выражается в секундах в минус первой степени.

**Интенсивность пучка** — отношение числа частиц, проходящих за данный интервал времени, к этому интервалу времени. Имеет размерность  $T^{-1}$  и выражается количеством частиц в секунду. Различают мгновенную, импульсную и среднюю интенсивность.

**Светимость области взаимодействия** — отношение количества взаимодействий частиц встречных пучков, происходящих за данное время, к этому времени и к эффективному сечению этих взаимодействий. Светимость не зависит от эффективного сечения взаимодействий и определяется интенсивностями встречных пучков, геометрией области взаимодействия и т. д.

Определяющим уравнением для светимости является

$$S_v = N/St,$$

где  $N$  — число частиц, прошедших за время  $t$  через сечение  $S$  (поперечное сечение пучков взаимодействующих частиц). Соответственно размерность светимости  $L^{-2}T^{-1}$ . Следует отметить, что на практике в качестве единицы светимости используют  $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а не  $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Значения светимости в лучших накопительных кольцах лежат в пределах  $10^{32}$ — $10^{34}$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

**Угол расходимости пучка** — угол, внутри которого заключены направления движения заранее обусловленной (значительной) доли ускоренных частиц. Безразмерен, выражается в единицах плоского или телесного угла. Часто угол расходимости пучка определяется из выражения

$$\text{tg } \alpha = \Delta r / \Delta z.$$

Здесь  $\Delta r$  — измеренное отклонение частицы от оси ускорителя (или канала транспортировки пучка) на расстоянии  $\Delta z$  вдоль оси.

**Фазовый объем пучка** — объем, заключенный внутри поверхности, ограничивающей изображение пучка в фазовом пространстве. В качестве фазового пространства может рассматриваться пространство декартовых координат и углов наклона траектории, или пространство координат и составляющих скорости частицы, или пространство координат и составляющих импульса:

$$V_{\Phi} = \int dx dy dz dx' dy' dz';$$

$$V_{\Phi} = \int dx dy dz \dot{x} \dot{y} \dot{z};$$

$$V_{\Phi} = \int dx dy dz dp_x dp_y d(p_z - p_{zp}).$$

В последнем выражении  $p_{zp}$  — импульс равновесной (расчетной) частицы.

Соответственно фазовый объем имеет размерность

$$\dim V_{\Phi} = L^3; \quad \dim V_{\Phi} = L^6 T^{-3}; \quad \dim V_{\Phi} = L^6 M^3 T^{-3},$$

а его единицами являются

$$\text{м}^3; \quad \text{м}^6 \cdot \text{с}^{-3}; \quad \text{м}^6 \cdot \text{кг}^3 \cdot \text{с}^{-3}.$$

**Эффективный фазовый объем** (с теми же единицами и размерностью) — фазовый объем, очерчиваемый изображением пучка в процессе колебаний частиц в фокусирующем канале.

**Эмиттанс (абсолютный эмиттанс)** — площадь проекции фазового

объема пучка на плоскость «поперечное смещение — угол наклона траектории»:

$$\mathcal{E}_x = \int dx dx', \quad \mathcal{E}_y = \int dy dy'.$$

Эмиттанс имеет размерность  $L$  и выражается в метр-радианах, а на практике — в сантиметр-миллирадианах или в миллиметр-миллирадианах:

$$1 \text{ мм} \cdot \text{мрад} = 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{рад}.$$

Те же единицы и ту же размерность имеют эмиттансы, аксептансы и адмиттансы, рассматриваемые ниже. При записи их числового значения рекомендуется выделять множитель  $\pi$  в явном виде, причем и в случаях, когда граница изображения пучка не является эллипсом. Например, вместо

$$\mathcal{E} = 6 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$$

рекомендуется писать

$$\mathcal{E} = \pi \cdot 1,91 \text{ мм} \cdot \text{мрад}.$$

Эффективный эмиттанс: 1) минимальная площадь эллипса, в который можно вписать проекцию фазового объема пучка на плоскость «поперечное смещение — угол наклона траектории» (рис. 6, а);

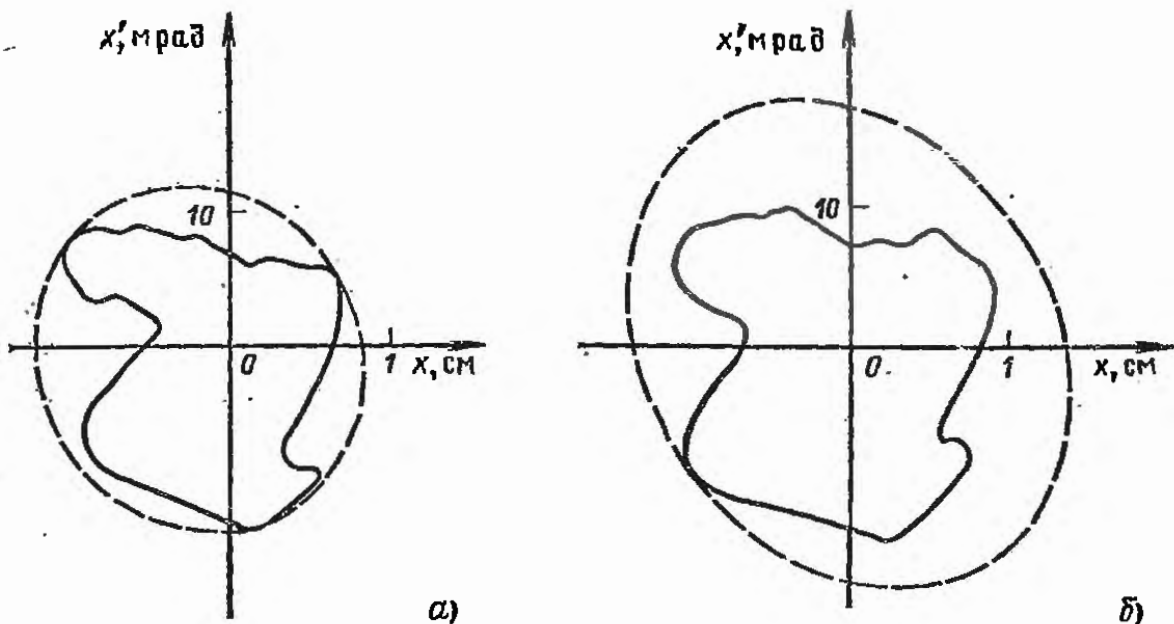


Рис. 6. К определению эффективного эмиттанса

2) площадь эллипса, очерчиваемого проекцией фазового объема пучка на той же плоскости в процессе колебаний частиц (рис. 6, б).

Приведенный (нормализованный) эмиттанс — произведение эмиттанса на приведенный импульс  $\beta\gamma$ :  $V_{\pi} = \beta\gamma\mathcal{E}$ .

Аксептанс канала — максимально возможный эмиттанс согласованного пучка, пропускаемого каналом. Обозначается буквой  $A$ .

Пропускная способность канала (приведенный или нормализованный аксептанс) — произведение аксептанса на  $\beta\gamma$ :  $V_k = \beta\gamma A$ .

Адмиттанс ускорителя — значение аксептанса на начальном участке ускорителя, характеризующее область захвата частиц.

## 17. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

К ионизирующим излучениям относят рентгеновское и гамма-излучение, а также потоки электронов, ионов и ядерных частиц, испускаемых радиоактивными атомами или другими источниками. Область рентгеновского излучения начинается у верхней границы ультрафиолетового излучения, при частоте  $\nu = 10^{17}$  Гц, и доходит до частоты  $\nu = 3 \cdot 10^{20}$  Гц (рис. 4). При более высоких частотах простирается область гамма-излучения. По длине волны две указанные границы соответствуют  $\lambda = 3 \cdot 10^{-9}$  м и  $\lambda = 10^{-12}$  м. Для сравнения заметим, что размер атома водорода — порядка  $10^{-10}$  м.

Ионизирующие излучения опасны для многих живых организмов. У человека нет органов чувств, непосредственно реагирующих на ионизирующие излучения, и его могут предупредить об опасности только соответствующие измерительные приборы. Что касается интенсивности и длительности, воздействие ионизирующих излучений на человека аналогично воздействию видимого света или звука. Существует порог чувствительности, ниже которого человеческий организм практически не воспринимает излучения, и порог опасности, с превышением которого могут наступить нежелательные и даже губительные последствия. Особенность ионизирующих излучений в том, что их воздействие человек начинает ощущать лишь спустя некоторое время. Впрочем, облучение ультрафиолетовым или видимым, но чрезвычайно сильным светом может сказаться не сразу.

Ионизирующие излучения, как и видимый свет или звук, характеризуют рядом объективно измеряемых физических величин. Среди них большую группу образуют энергетические величины (табл. П7). Однако объективные физические характеристики при всей их полезности и необходимости не могут в должной мере отразить физиологическое воздействие излучений на человеческий организм. Поэтому возникла необходимость введения особых физических величин и их единиц, которые позволяли бы оценивать воздействие ионизирующих излучений на человека и на различные материалы. Как и в случае света или звука, эти экспериментально устанавливаемые характеристики субъективны и для разных людей различны. Используются соответственно усредненные данные. Разумеется, те же характеристики у животных могут быть иными, чем у человека.

В связи с переходом на единицы Международной системы подлежат изъятию из обращения такие единицы, как рентген, рад, бэр и кюри. Учитывая широкое использование этих единиц в различных отраслях народного хозяйства, установлен единый по СССР переходный период до 1 января 1990 г. [7]. Кроме того, после 1 января 1990 г. не рекомендуется использование понятия экспозиционной дозы и ее мощности (см. ниже).

**Активность радионуклида в источнике (образце)** (активность радионуклида) есть отношение числа  $dN$  спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$A = dN/dt.$$

Активность радионуклида имеет размерность  $T^{-1}$  и выражается в беккерелях (Бк). Беккерель равен активности радионуклида в источнике, в котором за время 1 с происходит один спонтанный переход из определенного ядерно-энергетического состояния нуклида.

Внесистемная единица кюри (Ки) есть активность радионуклида в источнике, в котором за время 1 с происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  спонтанных переходов:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк (точно)}.$$

Объемная активность (концентрация) источника — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике к его объему  $V$ :

$$A_V = A/V.$$

Имеет размерность  $L^{-3}T^{-1}$  и выражается в беккерелях на кубический метр.

Удельная активность источника равна отношению активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к массе  $m$  источника (образца) или к массе элемента, соединения:

$$A_m = A/m.$$

Имеет размерность  $M^{-1}T^{-1}$  и выражается в беккерелях на килограмм.

Поток ионизирующих частиц — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , проходящих через даиную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$F = dN/dt.$$

Имеет размерность  $T^{-1}$  и выражается в секундах в минус первой степени. Для потока частиц, который характеризует степень загрязнения поверхностей радиоактивными веществами, предпочтительно использовать минуту в минус первой степени. Минута в минус первой степени равна потоку частиц, при котором через данную поверхность за 1 мин проходит одна частица.

Флюенс (перенос) ионизирующих частиц — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения  $dS$  этой сферы:

$$\Phi = dN/dS.$$

Имеет размерность  $L^{-2}$  и выражается в метрах в минус второй степени. Эта единица есть флюенс ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  проникает 1 частица.

Плотность потока ионизирующих частиц — отношение потока ионизирующих частиц  $dF$ , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения  $dS$  этой сферы:

$$\varphi = \frac{dF}{dS} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{dS dt}.$$

Имеет размерность  $L^{-2}T^{-1}$ . Ее единица есть секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени. Это плотность потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за 1 с проникает одна частица.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) — отношение энергии  $dW_\Delta$ , переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути  $dl$ , к длине этого пути:

$$L_\Delta = dW_\Delta / dl.$$

Здесь  $W_\Delta$  означает энергию, теряемую заряженной частицей в тех



столкновениях с электронами, при которых потеря энергии меньше граничной  $\Delta$ . Предпочтительнее выражать  $\Delta$  в электрон-вольтах. Например,  $L_{100}$  означает ЛПЭ при граничной энергии 100 эВ.

ЛПЭ имеет размерность  $LMT^{-2}$  и выражается в джоулях на метр (формально это совпадает с размерностью и единицей силы). Предпочтительнее выражать ЛПЭ в килоэлектрон-вольтах на микрометр:

$$1 \text{ кэВ/мкм} = 1,602 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м.}$$

**Линейная тормозная способность вещества** — отношение энергии  $dE$ , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$S = dE/dl = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}.$$

Здесь  $S_{\text{col}}$ ,  $S_{\text{rad}}$  — тормозные способности, обусловленные столкновениями (collision) и тормозным излучением (radiation);  $S_{\text{col}} = L_{\infty}$ . Величина  $S$  имеет те же единицы и размерность, что и ЛПЭ.

**Поглощенная доза ионизирующего излучения (доза излучения)**. Согласно так называемому энергетическому постулату изменения, происходящие в облучаемом веществе, определяются поглощенной дозой излучения — отношением средней энергии  $dW$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = dW/dm.$$

Поглощенная доза имеет размерность  $L^2T^{-2}$  и выражается в джоулях на килограмм. Этой единице присвоено название грей (Гр). Грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при котором веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Поглощенная доза излучения является основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия.

Подлежит изъятию из обращения широко распространенная в прошлом единица поглощенной дозы рад (рад, rad), названная по первым буквам английских слов radiation absorbed dose,

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

**Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения (мощность дозы излучения)** — отношение приращения поглощенной дозы  $dD$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = dD/dt.$$

Имеет размерность  $L^2T^{-3}$ . Ее единица — грей в секунду — есть мощность поглощенной дозы излучения, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения 1 Гр.

В области радиационной безопасности (аварийное облучение) предпочтительнее выражать мощность поглощенной дозы в миллигреях в минуту, при терапевтических процедурах — в греях в минуту.

**Керма** — отношение суммы начальных кинетических энергий  $dW_k$  всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$K = dW_k/dm.$$

Керма включает в себя полную энергию вторичных заряженных час-

тиц, в том числе и ту ее часть, которая расходуется затем на тормозное излучение. Эта последняя часть для фотонного излучения средних энергий и легкоатомных материалов относительно мала — порядка долей процента.

Керма имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и поглощенная доза ионизирующего излучения. Название керма — *kerma* — от первых букв английских слов *kinetic energy released in matter*. В условиях энергетического равновесия между первичным и вторичным излучениями керма приблизительно равна поглощенной дозе.

Мощность кермы — отношение приращения кермы  $dK$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{K} = dK/dt.$$

Имеет ту же размерность  $L^2T^{-3}$  и выражается в тех же единицах, что и мощность поглощенной дозы излучения.

Физические величины, характеризующие эффекты облучения. Энергетический постулат, однако, не имеет строгого обоснования. Поглощенная доза и керма — чисто энергетические величины, лишь косвенно отражающие биологические или технологические последствия облучения. Важно оценить биологические эффекты, т. е. изменения в организме человека, животных и растений при их облучении. Попытки связать биологический эффект с физически измеряемым ионизационным эффектом были предприняты еще в 20-х годах.

Длительное время основными видами изучаемой радиации были рентгеновское и гамма-излучение, т. е. потоки фотонов. Воздействие фотонов на вещество действительно можно измерять поглощенной дозой излучения. А поглощенная доза при облучении живых объектов фотонами пропорциональна ионизации, производимой фотонным излучением в воздухе, поскольку воздух может служить моделью воды или мышечной ткани (у них близкие эффективные атомные номера). Для рентгеновского излучения заданные дозы и их мощности сравнительно просто воспроизводятся и надежно измеряются (например, с помощью калиброванных рентгеновских источников и ионизационных камер).

Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза) — отношение суммарного заряда  $dq$  всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = dq/dm.$$

Экспозиционная доза имеет размерность  $M^{-1}T$  и выражается в кулонах на килограмм.

Имея в виду отказ от практического использования экспозиционной дозы и ее мощности по завершении переходного периода, во время этого периода значения этих величин следует указывать не в единицах СИ (Кл/кг, А/кг), а во внесистемных единицах — рентгенах и рентгенах в секунду. Единица экспозиционной дозы, названная рентгеном (R), была установлена в 1928 г. Ее определение приведено в § 29,

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг (точно)}.$$

Поскольку на образование одной пары ионов в среднем затрачивается энергия 33,85 эВ, экспозиционная доза в 1 Кл/кг соответст-

вует поглощенной в воздухе дозе излучения  $33,85 \text{ Дж/кг} = 33,85 \text{ Гр}$ , а экспозиционная доза в  $1 \text{ Р}$  — поглощенной в воздухе дозе  $8,7333 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/кг}$ , т. е. несколько менее  $1 \text{ рад}$ . Таков энергетический эквивалент рентгена.

Мощность экспозиционной дозы: фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы) — отношение приращения экспозиционной дозы  $dX$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$X = dX/dt.$$

Мощность экспозиционной дозы имеет размерность  $\text{М}^{-1}\text{I}$ , ее единица — ампер на килограмм. Однако, как уже говорилось, в переходный период следует применять не эту единицу СИ, а внесистемную единицу — рентген в секунду:

$$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг (точно)}.$$

Эквивалентная доза ионизирующего излучения (эквивалентная доза). Поскольку биологическое воздействие радиации сильно зависит от типа излучения, целесообразно сравнивать эффекты, вызванные любыми ионизирующими излучениями, с воздействием рентгеновского или гамма-излучения. При этом опираются на понятие поглощенной дозы.

Эквивалентной дозой излучения называют произведение поглощенной дозы  $D$  на средний коэффициент качества ионизирующего излучения  $k$  в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава:

$$H = Dk.$$

В качестве ткани стандартного состава принимается состав:

$$\text{O} — 76,2\%, \quad \text{C} — 11,1\%, \quad \text{H} — 10,1\%, \quad \text{N} — 2,6\%.$$

Эквивалентная доза имеет ту же размерность, что и поглощенная доза, т. е.  $\text{L}^2\text{T}^{-2}$ . Но единица эквивалентной дозы, равная джоулю на килограмм, разумеется, отлична от единицы поглощенной дозы — грея. В Международной системе единице эквивалентной дозы присвоено наименование зиверт (Зв).

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно  $1 \text{ Дж/кг}$ .

На практике широко применялась единица эквивалентной дозы с названием бэр (биологический эквивалент рентгена или, точнее, рада). Международное название этой единицы — rem от английских слов roentgen equivalent for man;

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}.$$

Эта единица подлежит изъятию из обращения к концу переходного периода.

Средний коэффициент качества ионизирующего излучения определяется по формуле

$$k = \frac{\int_0^{\infty} D(L) k(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL},$$

где  $D(L)$  — распределение поглощенной дозы по линейной передаче энергии;  $k(L)$  — регламентированная зависимость коэффициента качества от линейной передачи энергии согласно ГОСТ 8.496—83. Хотя коэффициент качества — величина безразмерная, он выражается в зивертах на грей.

Значения коэффициента качества  $k$  устанавливаются на основании радиобиологических экспериментов и приводятся в специальных справочных таблицах. Если энергетический состав излучения неизвестен, то при хроническом облучении в дозах, не превышающих значительно установленных безопасных норм, можно использовать следующие значения коэффициента качества: для электронов, рентгеновского и гамма-излучения  $k \approx 1$ ; для тепловых нейтронов  $k \approx 3$ ; для нейтронов, протонов и более тяжелых однозарядных частиц  $k \approx 10$ ; для  $\alpha$ -частиц, многозарядных частиц и частиц неизвестного заряда  $k \approx 20$ .

Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения (мощность эквивалентной дозы) — отношение приращения эквивалентной дозы  $dH$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{H} = dH/dt.$$

Имеет размерность  $L^2T^{-3}$  и выражается в зивертах в секунду. Зиверт в секунду равен мощности эквивалентной дозы, при которой за 1 с создается эквивалентная доза 1 Зв.

Поскольку время пребывания человека в поле излучения при допустимых его уровнях измеряется, как правило, часами, предпочтительно выражать мощность эквивалентной дозы в микрозивертах в час.

Удельная поглощенная доза есть отношение поглощенной дозы излучения к флюенсу ионизирующих частиц:

$$\delta = D/\Phi.$$

Имеет размерность  $L^4T^{-2}$  и выражается в грей-квадратных метрах.

Подлежит изъятию из обращения применявшаяся ранее единица рад-квадратный сантиметр:

$$1 \text{ рад} \cdot \text{см}^2 = 10^{-6} \text{ Гр} \cdot \text{м}^2.$$

Удельная эквивалентная доза есть отношение эквивалентной дозы к флюенсу ионизирующих частиц:

$$h = H/\Phi = kD/\Phi.$$

Удельная эквивалентная доза, как и удельная поглощенная доза, имеет размерность  $L^4T^{-2}$ , но выражается в других единицах — в зиверт-квадратных метрах. Подлежит изъятию из обращения другая ее единица — бэр-квадратный сантиметр:

$$1 \text{ бэр} \cdot \text{см}^2 = 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{м}^2.$$

Коэффициент перехода от флюенса к эквивалентной дозе или от плотности потока частиц к мощности эквивалентной дозы есть величина, обратная удельной эквивалентной дозе:

$$b = \Phi/H = \varphi/\dot{H} = 1/h.$$

Коэффициент перехода имеет размерность  $L^{-4}T^2$  и выражается в частицах на зиверт-квадратный метр.

Предельно допустимые дозы (ПДД). Согласно заключению Меж-

дународной комиссии по радиационной защите вредные эффекты могут наступать при эквивалентных дозах не менее 1,5 Зв/год (150 бэр/год), а в случаях кратковременного облучения — при дозах выше 0,5 Зв (50 бэр). Когда облучение превышает некоторый порог, возникает лучевая болезнь. Различают хроническую и острую (при однократном массивном воздействии) формы этой болезни. Острую лучевую болезнь по тяжести подразделяют на четыре степени, начиная от дозы 1—2 Зв (100—200 бэр, 1-я степень) до дозы более 6 Зв (600 бэр, 4-я степень).

Дозы, получаемые в обычных условиях, ничтожны по сравнению с указанными. Мощность эквивалентной дозы, создаваемой естественным излучением, колеблется от 0,05 до 0,2 мкЗв/ч, т. е. от 0,44 до 1,75 мЗв/год (44—175 мбэр/год). При медицинских диагностических процедурах — рентгеновских снимках и т. п. — человек получает еще примерно 1,4 мЗв/год. Поскольку в кирпиче и бетоне в небольших количествах присутствуют радиоактивные элементы, доза возрастает еще на 1,5 мЗв/год. Наконец, из-за выбросов современных тепловых электростанций, работающих на угле, и при полетах на самолете человек получает до 4 мЗв/год. Итого существующий фон может достигать 10 мЗв/год, но в среднем не превышает 5 мЗв/год (0,5 бэр/год).

Такие дозы совершенно безвредны для человека. Предел дозы (ПД) в добавление к существующему фону для ограниченной части населения в зонах повышенной радиации установлен 5 мЗв/год (0,5 бэр/год), т. е. с 300-кратным запасом. Для персонала, работающего с источниками ионизирующих излучений, в СССР установлена предельно допустимая доза (ПДД) 50 мЗв/год (5 бэр/год), т. е. 28 мкЗв/ч при 36-часовой рабочей неделе.

## Глава 4

# ГАУССОВА СИСТЕМА

## 18. ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ И СТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ. НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ

Гауссова система, называемая также симметричной или смешанной, образована путем соединения электрических единиц системы СГСЭ и магнитных единиц системы СГСМ. Это своеобразное объединение единиц двух разных систем придало гауссовой системе черты, выделяющие ее среди всех других систем единиц электромагнетизма. Гауссова система построена на трех основных единицах:

сантиметр — единица длины,

грамм — единица массы;

секунда — единица времени.

Нередко гауссову систему обозначают буквами СГС(Г), чтобы не только указать основные единицы, но и подчеркнуть ее отличие от других систем СГС.

Гауссова система единиц существенно отличается от системы, построенной Гауссом в 1832 г., и появилась значительно позднее, в последние десятилетия XIX в. К этому времени было признано, что в качестве основных единиц более удобны сантиметр, грамм и секунда, и была построена система механических единиц СГС.

Последовательное образование производных единиц электричества и магнетизма на базе трех основных единиц (длины, массы и времени) можно осуществить не одним, а двумя разными способами. Можно исходить вслед за Гауссом из закона Кулона для взаимодействия магнитных масс. Несмотря на фиктивность понятия магнитной массы это приводит к логически стройной системе единиц, получившей название электромагнитной системы СГС, или системы СГСМ. Но можно исходить и из закона Кулона для электрических зарядов. Получается не менее стройная электростатическая система СГС, или система СГСЭ.

Системы СГСМ и СГСЭ, разработанные под руководством Максвелла, в 1881 г. были одобрены и утверждены Первым Международным конгрессом электриков в Париже. Эти две системы, а также и другие появившиеся впоследствии системы единиц электромагнетизма, основанные на сантиметре, грамме и секунде, рассматриваются в гл. 5. Широкое распространение получила, однако, лишь гауссова система, объединившая электрические единицы СГСЭ и магнитные единицы СГСМ.

К гауссовой системе нередко относят также и системы единиц СГС, разработанные для других областей физики — от механики и теплоты до ионизирующих излучений.

Гауссова система единиц не узаконена какими-либо международными актами и никогда не получала официального признания на международных конгрессах электриков или на генеральных конференциях по мерам и весам.

В Советском Союзе с 1 января 1957 г. действовал стандарт ГОСТ 8033—56 «Электрические и магнитные единицы», устанавливавший систему единиц МКСА, но допускавший также и систему СГС. Характерно, что наименование «гауссова» в этом стандарте не упоминалось. Не было явного упоминания о гауссовой системе и в ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц», введенном в действие с 1 января 1963 г.

Наконец, и в ныне действующем ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин», устанавливающим обязательное применение Международной системы единиц, нет явного упоминания о гауссовой системе. Однако ее применение допускается с оговорками в научных исследованиях. Это можно видеть из следующей фразы на с. 1 стандарта: «Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикации их результатов, если в них не рассматривают и не используют результаты измерений конкретных физических величин».

Фактически гауссова система применяется в настоящее время только в теоретических работах, главным образом в физике и астрономии.

## 19. МЕХАНИКА И АКУСТИКА

В области механики и акустики не только система СГС, но и другие позднее появившиеся системы используют три основные единицы. В подавляющем большинстве систем ими являются единицы длины, массы и времени. Определяющие уравнения в этих системах, и в частности в СГС и СИ, одни и те же. Поэтому размерности физических величин механики и акустики в системе СГС такие же, как и в Международной системе (табл. ПЗ, П6). Они имеют общий вид

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma.$$

Единицы времени в системах СГС и СИ совпадают. Единица длины в СГС сантиметр в  $10^2$  раз меньше, чем в СИ, а единица массы грамм в  $10^3$  раз меньше единицы СИ — килограмма. Поэтому производные единицы механики и акустики в системе СГС в

$$\tau = 10^{2\alpha+3\beta} \quad (11)$$

раз меньше, чем в Международной системе.

Например, ускорение имеет размерность  $LT^{-2}$ , т.е.  $\alpha=1, \beta=0$ . Поэтому единица ускорения СГС в  $10^2$  раз меньше единицы СИ, что, впрочем, видно и непосредственно:  $1 \text{ см/с}^2 = 0,01 \text{ м/с}^2$ . Эту единицу предлагалось называть гал по имени Галилея.

Сила имеет размерность  $LMT^{-2}$ , и для нее  $\alpha=\beta=1, 2\alpha+3\beta=5$ . Единица силы в системе СГС носит название дина (дин);

$$1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н.}$$

Для давления  $p$ , имеющего размерность  $L^{-1}MT^{-2}$ , получаем  $\alpha=-1, \beta=1; 2\alpha+3\beta=1$ . Поэтому  $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$ . В этих единицах выражается, в частности, и звуковое давление. Единицу  $\text{дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$  называют бария. Прежде ее называли бар. Теперь  $\text{бар} = 10^5 \text{ Па}$ .

Энергия и работа  $W$  имеют размерность  $L^2MT^{-2}$ , которой соответствует  $\alpha=2; \beta=1; 2\alpha+3\beta=7$ . Поэтому единица энергии и работы, носящая название эрг (эрг), равна  $10^{-7}$  Дж.

Так же относятся между собой единицы мощности, единицы потока энергии, единицы потока звуковой энергии;  $1 \text{ эрг/с} = 10^{-7} \text{ Вт}$ .

Плотность потока энергии  $P_1$ , и в частности интенсивность звука, имеет размерность  $MT^{-3}$ . Поскольку для этой величины  $\alpha=0, \beta=1$ , получаем для единиц плотности потока энергии соотношение  $1 \text{ эрг/(с}\cdot\text{см}^2) = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ .

Динамическая вязкость  $\eta$  с ее размерностью  $L^{-1}MT^{-1}$  выражается в системе СГС в единицах дина-секунда на квадратный сантиметр. Эту единицу называют пуаз (П). Так как для динамической вязкости  $\alpha=-1, \beta=1$ , то  $2\alpha+3\beta=1$  и  $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Кинематическая вязкость  $\nu$  имеет размерность  $L^2T^{-1}$ , для нее  $\alpha=2; \beta=0; 2\alpha+3\beta=4$ . Поэтому единица кинематической вязкости — квадратный сантиметр на секунду ( $\text{см}^2/\text{с}$ ), которая носит название стокс (Ст, St), равна  $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Аналогично получают соотношения и между другими единицами механики и акустики в системах СГС и СИ.

Многие единицы СГС по своему размеру неудобны на практике — они в большинстве случаев слишком малы. Например, едва шевельнув пальцем или мигнув глазом, человек затрачивает энергию в сотни эрг. Электрическая лампочка мощностью в 60 Вт называлась бы в системе СГС лампой с мощностью  $6 \cdot 10^8$  эрг/с. Единица давления — дина на квадратный сантиметр — приблизительно в миллион раз меньше атмосферного давления. Но единица плотности довольно удобна по размеру — грамм на кубический сантиметр есть приблизительно плотность воды при нормальных условиях.

## 20. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Единицы электричества и магнетизма, происходящие от двух разных систем, выделяют гауссову систему среди всех других.

Единицы систем СГСЭ и СГСМ определяются из приведенных

в § 12 уравнений (3)—(11):

$$\left. \begin{aligned} I = q/t; \quad \varphi = U = \mathcal{E} = A/q; \quad E = F/q = U/s; \\ C = U/q; \quad R = U/I; \quad G = 1/R; \quad D = \epsilon_0 \epsilon E; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$B = \mu_0 \mu H; \quad \Phi = BS; \quad \Psi = n\Phi; \quad F_m = \oint H dt; \quad R_m = F_m/\Phi, \quad (13)$$

$$B = F/(lI); \quad \Psi = LI; \quad \mathcal{E} = -d\Psi/dt; \quad \mathcal{E} = -L dI/dt. \quad (14)$$

Ниже потребуется также равенство, связывающее постоянные  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  со скоростью света в вакууме:

$$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2. \quad (15)$$

Уравнения (12)—(15) одинаковы для всех внутренне последовательных систем единиц, в том числе для СГСЭ, СГСМ и СИ. Заметим, что рационализация не затрагивает вида этих уравнений.

В гауссовой системе единиц в отличие от всех других систем уравнения электромагнетизма (12)—(15) перестают существовать как целостная система уравнений. В них вносятся существенные изменения. Прежде всего, в нарушение равенства (15), в гауссовой системе принято

$$\epsilon_0 = \mu_0 = 1,$$

так что согласно уравнениям (12), (13)

$$D = \epsilon E; \quad B = \mu H. \quad (16)$$

Электрические единицы гауссовой системы совпадают с единицами СГСЭ. В качестве исходного определяющего уравнения используют закон Кулона, выражающий силу взаимодействия двух точечных электрических зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга. Закон Кулона, как и другие уравнения гауссовой системы, пишут в нерационализованной форме (без коэффициента  $4\pi$  в знаменателе):

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (17)$$

Согласно этому закону единица электрического заряда в гауссовой системе и системе СГСЭ есть заряд, который взаимодействует в вакууме с равным ему зарядом на расстоянии в 1 см с силой 1 дин. Эту единицу заряда иногда называют франклином (Фр).

Другие электрические единицы СГСЭ и гауссовой системы могут быть определены из уравнений (12).

Единица силы электрического тока равна силе тока, при котором за 1 с через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд в 1 Фр.

Единица электрического потенциала (напряжения, электродвигущей силы) есть разность потенциалов, по прохождении которой заряд в 1 Фр приобретает энергию в 1 эрг.

Единица напряженности электрического поля равна напряженности такого поля, которое на электрический заряд в 1 Фр действует с силой в 1 дин или потенциал которого на отрезке в 1 см изменяется на единицу потенциала.

Единица электрического сопротивления есть сопротивление, при



приложении к которому напряжения, равного единице, возникает ток силой 1 Фр/с.

За единицу электрической емкости принимается такая емкость, при сообщении которой заряда в 1 Фр создается разность потенциалов, равная единице потенциала.

Единица электрического смещения (электрической индукции) есть электрическое смещение в вакууме при напряженности электрического поля, равной единице напряженности.

Определим отношение электрических единиц СГСЭ и гауссовой системы к единицам СИ.

В Международной системе закон Кулона пишется в рационализованной форме и при  $q_1 = q_2 = q$  имеет вид

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} = \frac{\mu_0 c^2 q^2}{4\pi\epsilon r^2}.$$

А в системе СГСЭ согласно уравнению (17)

$$F = \frac{q^2}{\epsilon r^2}.$$

Разделив одно равенство на другое, найдем отношение *числовых значений* электрического заряда в указанных системах:

$$\begin{aligned} \frac{\{q\}_{и}^2}{\{q\}_{э}^2} &= \frac{4\pi}{\{\mu_0\}_{и}} \cdot \frac{\{r\}_{и}^2}{\{r\}_{э}^2} \cdot \frac{\{F\}_{и}}{\{F\}_{э}} \cdot \frac{1}{\{c\}_{и}^2} = \\ &= 10^7 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10^4}{\zeta^2} = \frac{100}{\zeta^2}. \end{aligned}$$

Здесь  $\zeta \approx 3 \cdot 10^{10}$  — числовое значение скорости света в системе СГС; индексы «э» и «и» указывают на принадлежность физических величин и их единиц к системе СГСЭ и СИ соответственно.

Размеры единиц обратно пропорциональны числовым значениям физических величин. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{франклин}}{\text{кулон}} &= \frac{\{q\}_{и}}{\{q\}_{э}} = \frac{10}{\zeta}; \\ \text{франклин} &= \frac{10}{\zeta} \cdot \text{кулон} \approx \frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ кулон}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Единицу силы электрического тока определим, разделив равенство (18) на единицу времени — секунду:

$$[I]_{э} = \frac{10}{\zeta} \text{ ампер} \approx \frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ ампер}.$$

Большинство электрических и магнитных единиц гауссовой системы, как и систем СГСЭ, СГСМ, не имеет специальных наименований и общепринятых обозначений. В литературе можно встретить, например, следующие варианты обозначения единицы силы электрического тока:

СГС, СГСЭ, ед. СГС, ед. СГС<sub>Г</sub>, СГС(I), [I], статампер.

Используемые здесь и ниже обозначения вида  $[I]_{э}$ , будучи краткими, вместе с тем четко указывают физическую величину и систему, к которой относится данная единица.

Единицы электрического потенциала, напряженности электрического поля, электрической емкости, электрического сопротивления и проводимости в гауссовой системе согласно определяющим уравнениям (12) имеют следующие размеры:

$$[\varphi]_g = [U]_g = [C]_g = \frac{\text{эрг}}{\text{франклин}} = \frac{10^{-7} \text{ джоуль}}{(10/3) \text{ кулон}} \approx 300 \text{ вольт};$$

$$[E]_g = \frac{[U]_g}{\text{сантиметр}} \approx \frac{300 \text{ вольт}}{0,01 \text{ метр}} = 3 \cdot 10^4 \text{ вольт на метр};$$

$$[C]_g = \frac{\text{франклин}}{[U]_g} \approx \frac{(1/3) \cdot 10^{-9} \text{ кулон}}{300 \text{ вольт}} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ фарад};$$

$$[R]_g = \frac{[U]_g}{[I]_g} \approx \frac{300 \text{ вольт}}{(1/3) \cdot 10^{-9} \text{ ампер}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ ом};$$

$$[G]_g = \frac{1}{[R]_g} \approx \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ сименс}.$$

Единицу электрической емкости  $[C]_g$ , имеющую размерность длины, называют сантиметром.

Для вычисления единицы электрического смещения (электрической индукции) снова воспользуемся обратной пропорциональностью между размерами единиц и числовыми значениями физических величин:

$$\begin{aligned} \frac{[D]_g}{[D]_{\text{и}}} &= \frac{\{D\}_{\text{и}}}{\{D\}_g} = \frac{\{\epsilon_0 E\}_{\text{и}}}{\{\epsilon_0 E\}_g} = \frac{\{\epsilon_0\}_{\text{и}} [E]_g}{\{\epsilon_0\}_g [E]_{\text{и}}} \approx \\ &\approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \cdot 3 \cdot 10^4 = \frac{10^{-5}}{12\pi}. \end{aligned} \quad (19)$$

Единица электрического смещения в системе СГСЭ, следовательно, равна

$$[D]_g \approx \frac{10^{-5}}{12\pi} \text{ кулон на квадратный метр}.$$

Образование других производных электрических единиц СГСЭ и гауссовой системы по их определяющим уравнениям (например, единиц плотности электрического тока  $I=I/S$ , удельного электрического сопротивления  $\rho=RS/l$ , электрического момента диполя  $p_e=ql$ ) не представляет каких-либо трудностей.

## 21. МАГНИТНЫЕ ЕДИНИЦЫ И МОДИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ

При образовании магнитных единиц гауссовой системы встречаются с известными затруднениями. Использовать в качестве исходного определяющего уравнения закон Кулона для магнитных масс нежелательно ввиду фиктивности понятия магнитной массы. А образовать какую-либо магнитную единицу по магнитному действию электрического тока или по электрическому действию изменяющегося магнитного поля, например из уравнений (14), непосредственно невозможно.

Действительно, гауссова система представляет комбинацию еди-

ниц двух разных систем — электрических единиц СГСЭ и магнитных единиц СГСМ. Уравнения (12) содержат исключительно электрические величины и в гауссовой системе не изменяют своего вида. Точно так же сохраняется вид уравнений (13), в которые входят одни только магнитные величины. Но уравнения, связывающие электрические величины с магнитными, и в частности уравнения (14), оказываются как бы на стыке единиц двух систем и видоизменяются.

Напишем закон Кулона для взаимодействия двух одинаковых электрических зарядов  $q_1 = q_2 = q$  в системе СГСЭ, где  $\epsilon_0 = 1$ , и в системе СГСМ, где  $\mu_0 = 1$  и согласно (15)  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 1/c^2$ :

$$F = \frac{q_{\text{Э}}^2}{\epsilon r^2}; \quad F = \frac{c^2 q_{\text{М}}^2}{\epsilon r^2}. \quad (20)$$

Индексы «э» и «м» указывают на принадлежность физической величины, как и ее единицы, к системе СГСЭ или СГСМ соответственно.

Поскольку в обеих системах сила  $F$  и расстояние  $r$  измеряются одинаковыми единицами, электрические заряды в системах СГСМ и СГСЭ связаны соотношением

$$q_{\text{Э}} = c q_{\text{М}} \quad (21)$$

и отличаются как по числовому значению, так и по размерности.

Точно так же в двух системах, СГСМ и СГСЭ, различны числовые значения и размерность вообще для всех электрических и магнитных величин (см. § 26). Так, сила электрического тока и другие электрические величины, выраженные равенствами (12), в этих двух системах в силу равенства (21) связаны соотношениями

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{М}} &= \frac{1}{c} I_{\text{Э}}; & J_{\text{М}} &= \frac{1}{c} J_{\text{Э}}; & \mathcal{E}_{\text{М}} &= c \mathcal{E}_{\text{Э}}; & E_{\text{М}} &= c E_{\text{Э}}; \\ C_{\text{М}} &= \frac{1}{c^2} C_{\text{Э}}; & R_{\text{М}} &= c^2 R_{\text{Э}}; & D_{\text{М}} &= \frac{\epsilon}{c^2} E_{\text{М}} = \frac{\epsilon}{c} E_{\text{Э}} = \frac{1}{c} D_{\text{Э}}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Теперь нетрудно установить, какой вид принимают в гауссовой системе уравнения, связывающие электрические и магнитные величины, и в частности уравнения (14). Каждое из уравнений (12)–(14) справедливо как в системе СГСМ, так и в системе СГСЭ. Будем считать, что они относятся к системе СГСМ, т. е. припишем в них всем величинам индекс «м». Но в уравнениях гауссовой системы электрические величины должны принадлежать к системе СГСЭ, а магнитные — к СГСМ. Поэтому электрические величины системы СГСМ (с индексом «м») необходимо выразить через величины системы СГСЭ (с индексом «э»), используя равенства (21) и (22). Например, приписав в уравнениях (14) всем величинам индекс «м»:

$$V_{\text{М}} = \frac{F}{I_{\text{М}} l}; \quad \Psi_{\text{М}} = L_{\text{М}} I_{\text{М}}; \quad \mathcal{E}_{\text{М}} = - \frac{d\Psi_{\text{М}}}{dt}; \quad \mathcal{E}_{\text{М}} = - L_{\text{М}} \frac{dI_{\text{М}}}{dt},$$

затем необходимо подставить

$$I_{\text{М}} = \frac{1}{c} I_{\text{Э}}; \quad \mathcal{E}_{\text{М}} = c \mathcal{E}_{\text{Э}}.$$

В результате находим, что в гауссовой системе вместо уравне-

ний (14) имеют место уравнения

$$B = \frac{cF}{Il}; \quad \Psi = \frac{1}{c} LI; \quad \mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Psi}{dt}; \quad \mathcal{E} = -\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt} \quad (23)$$

(индексы «м» при магнитных величинах и индексы «э» при электрических величинах, как более не нужные, опускают).

Таким образом, равенства (21) и (22) позволяют привести любое уравнение, связывающее электрические и магнитные величины и написанное в нерационализованной форме, к виду, который оно принимает в гауссовой системе.

Так, нерационализованные уравнения Максвелла

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= 4\pi \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; & \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0; & \operatorname{div} \mathbf{D} &= 4\pi \rho \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

и выражение для силы Лоренца

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}\mathbf{B}]$$

в гауссовой системе имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \left( 4\pi \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right); & \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0; & \operatorname{div} \mathbf{D} &= 4\pi \rho, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{1}{c} q[\mathbf{v}\mathbf{B}]. \quad (25')$$

Для вакуума в уравнениях (25), (25') можно заменить  $\mathbf{D}$  на  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  на  $\mathbf{H}$ .

Уравнения электромагнетизма в том виде, который они принимают в гауссовой системе, представлены в табл. П14.

Итак, в уравнениях гауссовой системы, связывающих электрические и магнитные величины, появляется «электродинамический коэффициент»  $c$  (скорость света в вакууме) в той или иной степени. Появление отличных от единицы и, более того, размерных коэффициентов лишает гауссову систему когерентности (согласованности). Согласованность сохраняется только внутри каждой из двух обособленных групп единиц — между электрическими единицами и отдельно между магнитными единицами.

В указанной модификации уравнений электромагнетизма и в утрате когерентности сказывается непоследовательность строения гауссовой системы.

Уравнения (23) позволяют образовать единицы магнитной индукции и индуктивности в гауссовой системе. Эти единицы носят названия гаусс (Гс) и сантиметр (единица индуктивности системы СГСМ, как и единица электрической емкости системы СГСЭ, обладает размерностью длины). Учитывая, что размер единицы обратно пропорционален числовому значению физической величины, получаем

$$\text{гаусс} = \frac{[F]}{\zeta [I]_0 [l]} = \frac{10^{-5} \text{ ньютон}}{3 \cdot 10^{10} (1/3) 10^{-9} \text{ ампер} \cdot 0,01 \text{ метр}},$$

т. е.

$$\text{гаусс} = 10^{-4} \text{ тесла}, \quad (26)$$

$$[L]_{\text{м}} = \text{сантиметр} = \frac{[C]_{\text{э}} [t]}{\zeta^2 [I]_{\text{э}}} = \frac{300 \text{ вольт} \cdot \text{секунда}}{9 \cdot 10^{20} (1/3) 10^{-9} \text{ ампер}} = 10^{-9} \text{ генри}.$$

Гаусс есть магнитная индукция поля, которое на отрезок длиной 1 см проводника с током силой  $3 \cdot 10^{10}$  Фр/с действует с максимальной силой в 1 дин.

Сантиметр есть индуктивность цепи, в которой при изменении силы тока со скоростью  $9 \cdot 10^{20}$  Фр/с<sup>2</sup> возникает электродвижущая сила, равная единице напряжения.

Из этих определений, содержащих коэффициенты  $\zeta$  и  $\zeta^2$ , явно видна некогерентность (несогласованность) электрических и магнитных единиц в гауссовой системе.

Единицы магнитного потока и потокосцепления, напряженности магнитного поля, магнитодвижущей силы образуются посредством уравнений (13). Эти единицы носят названия максвелл (Мкс), эрстед (Э) и гильберт (Гб).

Максвелл есть магнитный поток через поверхность площадью 1 см<sup>2</sup>, создаваемый полем с индукцией 1 Гс:

$$\begin{aligned} \text{максвелл} &= [B]_{\text{м}} [S] = \text{гаусс} \cdot \text{квадратный сантиметр} = \\ &= 10^{-4} \text{ тесла} \cdot 10^{-4} \text{ квадратный метр}, \end{aligned}$$

т. е.

$$1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}.$$

Эрстед есть напряженность магнитного поля в вакууме при магнитной индукции, равной 1 Гс. Отношение эрстеда к единице СИ равно

$$\begin{aligned} \frac{[H]_{\text{м}}}{[H]_{\text{и}}} &= \frac{\{H\}_{\text{и}}}{\{H\}_{\text{м}}} = \left\{ \frac{B}{\mu_0} \right\}_{\text{и}} \left\{ \frac{\mu_0}{B} \right\}_{\text{м}} = \frac{\{\mu_0\}_{\text{м}} [B]_{\text{м}}}{\{\mu_0\}_{\text{и}} [B]_{\text{и}}} = \\ &= \frac{10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{1000}{4\pi}, \end{aligned} \quad (27)$$

т. е.

$$\text{эрстед} = \frac{1000}{4\pi} \text{ ампер на метр}.$$

Гильберт есть магнитодвижущая сила, создающая магнитное поле с напряженностью в 1 Э на участке длиной в 1 см:

$$\text{гильберт} = \text{эрстед} \cdot \text{сантиметр} = \frac{1000 \text{ А} \cdot \text{см}}{4\pi \cdot \text{м}} = \frac{10}{4\pi} \text{ ампер}.$$

Единица магнитного сопротивления есть сопротивление магнитной цепи, в которой при магнитодвижущей силе в 1 Гб проходит магнитный поток в 1 Мкс:

$$[R_m]_{\text{м}} = \frac{\text{гильберт}}{\text{максвелл}} = \frac{10 \text{ ампер}}{4\pi \cdot 10^{-8} \text{ вебер}} = \frac{10^9}{4\pi} \text{ генри}^{-1}.$$

В табл. П18 приведены соотношения между единицами гауссовой системы и СИ также и для других электрических и магнитных величин.

## 22. ДРОБНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗМЕРНОСТИ

Размерность величин электромагнетизма в гауссовой системе целесообразно устанавливать, исходя одновременно из двух законов Кулона. Наряду с законом, выражающим силу взаимодействия двух электрических зарядов  $q_1 = q_2 = q$ , пишут и закон для силы взаимодействия двух магнитных масс  $m_1 = m_2 = m$

$$F = \frac{q^2}{\epsilon r^2}; \quad F = \frac{m^2}{\mu r^2}. \quad (23)$$

Итак, ниже используется понятие «магнитная масса» («магнитный заряд», «количество магнетизма»). Разумеется, концы магнита не несут никаких магнитных масс или магнитных зарядов. Это понятие фиктивное. Но ввиду одинаковой структуры двух законов Кулона (28) выявляется источник совпадения размерности электрических и магнитных величин, начиная с электрического заряда и магнитной массы.

Переписав уравнения (28) в виде

$$q = r \sqrt{\epsilon F}; \quad m = r \sqrt{\mu F},$$

находим

$$\dim q = \dim m = L \sqrt{\dim F} = L \sqrt{LMT^{-2}} = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}. \quad (29)$$

Обращают на себя внимание дробные показатели размерности. Полученные первоначально для электрического заряда и магнитной массы, дробные показатели распространяются затем и на большинство других электрических и магнитных величин.

Сила электрического тока  $I = q/t$  имеет размерность

$$\dim I = T^{-1} \dim q = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}.$$

Напряженность электрического поля и напряженность магнитного поля

$$E = F/q, \quad H = F/m$$

подобно электрическому заряду и магнитной массе также имеют одинаковую размерность:

$$\dim E = \dim H = \frac{\dim F}{\dim q} = \frac{LMT^{-2}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}} = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}.$$

Такую же размерность вследствие равенств (16) имеют электрическое смещение и магнитная индукция:

$$\dim D = \dim E = \dim H = \dim B = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}.$$

Поток электрического смещения, магнитный поток и потокоцепление

$$\Phi_e = DS; \quad \Phi = BS; \quad \Psi = n\Phi$$

имеют размерность

$$\dim \Phi_e = \dim \Phi = \dim \Psi = L^2 \dim D = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1},$$

которая совпадает с размерностью электрического заряда и магнитной массы (29).

## Электрический и магнитный моменты диполей

$$p_e = ql; \quad p_m = ml$$

имеют одинаковую размерность:

$$\dim p_e = \dim p_m = L \dim q = L^{5/2} M^{1/2} T^{-1}.$$

Согласно уравнениям (12) и (23) электрический потенциал (напряжение, ЭДС), электрическая емкость, сопротивление, электрическая проводимость и индуктивность имеют размерности

$$\dim \varphi = \dim U = \dim \mathcal{E} = L \dim E = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1},$$

$$\dim C = \frac{\dim q}{\dim U} = \frac{L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}}{L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}} = L;$$

$$\dim R = \frac{\dim U}{\dim I} = \frac{L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}} = L^{-1} T;$$

$$\dim G = \frac{1}{\dim R} = LT^{-1};$$

$$\dim L = \frac{\dim c \dim \Psi}{\dim I} = \frac{LT^{-1} L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}} = L.$$

Удельное электрическое сопротивление

$$\rho = RS/l$$

имеет размерность

$$\dim \rho = L \dim R = T.$$

Наконец, магнитодвижущая сила и магнитное сопротивление

$$F_m = \oint H dl; \quad R_m = F_m/\Phi$$

имеют размерности

$$\dim F_m = L \dim H = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}; \quad \dim R_m = \frac{\dim F_m}{\dim \Phi} = L^{-1}.$$

Магнитодвижущая сила имеет ту же размерность, что и ЭДС.

Как можно видеть, в гауссовой системе имеют место частые совпадения размерности явно различных физических величин. В частности, совпадает размерность четырех величин — электрического смещения, магнитной индукции, напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля. В дополнение к этому наблюдается и озадачивающая простота размерности некоторых величин электромагнетизма, как бы свидетельствующая об их родстве с механическими величинами. Так, электрическая проводимость имеет размерность скорости, удельное электрическое сопротивление — размерность времени. Размерности индуктивности и электрической емкости не только одинаковы, но и совпадают с размерностью длины.

Размерности электрических и магнитных величин в гауссовой системе приведены в табл. П16, П17.

## 23. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИСТЕМЫ СГС НА ДРУГИЕ ОБЛАСТИ ЯВЛЕНИЙ

Система СГС, как уже отмечалось, была распространена и на другие области явлений. Однако при этом число основных единиц уже не ограничивалось тремя и в каждой области использовалась еще одна основная единица. Для тепловых единиц к сантиметру, грамму и секунде был добавлен градус Цельсия, для световых единиц — люмен, для единиц молекулярной физики — моль.

С разработкой и принятием Международной системы единиц в указанных частных системах были произведены изменения, сближающие СГС и СИ. Градус Цельсия заменили на кельвин, вместо люмена за основную единицу приняли свечу (канделу).

Иногда название «гауссова система» употребляют в расширительном смысле, понимая под ним не только систему электрических и магнитных единиц, но и всю совокупность систем, в число основных единиц которых входят сантиметр, грамм и секунда. Разумеется, единицы электромагнетизма остаются ядром такой расширенной системы.

Таким образом, в расширенной системе СГС шесть основных единиц:

- сантиметр — единица длины;
- грамм — единица массы;
- секунда — единица времени;
- кельвин — единица термодинамической температуры;
- моль — единица количества вещества;
- кандела — единица силы света.

К этим основным единицам добавляются и две дополнительные:

- радиан — единица плоского угла;
- стерадиан — единица телесного угла.

Перечисленные основные и дополнительные единицы СГС относятся к тем же физическим величинам, что и соответствующие единицы СИ. Поэтому размерность производных единиц СГС в области теплоты, молекулярной физики и световых явлений выражается в виде

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (30)$$

и для каждой из физических величин такая же, как и в Международной системе (табл. П5, П7). Все показатели размерности при этом целочисленны.

Основные и дополнительные единицы СГС совпадают с соответствующими единицами СИ также и по размеру, за исключением единиц длины и массы. Сантиметр в  $10^2$  раз меньше единицы СИ — метра, а грамм в  $10^3$  раз меньше килограмма. Следовательно, производные единицы СГС в области теплоты, света и молекулярной физики в

$$\tau = 10^{2\alpha+3\beta} \quad (31)$$

раз меньше, чем в Международной системе. Выражения (30) и (31) справедливы также и для тех единиц ионизирующих излучений, которые не связаны с электрическим зарядом или током.

Выражение (31) совпадает с установленным выше соотношением (11) между производными единицами СГС и СИ для области механики и акустики.



В более простых случаях соотношение между единицами СГС и СИ можно найти и непосредственно, не прибегая к формуле (31). Приведем примеры.

**Теплоемкость и энтропия системы**

$$C = Q/\Delta T, \quad S = Q/T$$

выражаются в эргах на кельвин. Эрг на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой возрастает на 1 К при подведении тепловой энергии (количества теплоты) в 1 эрг:

$$1 \text{ эрг/К} = 10^{-7} \text{ Дж/К}.$$

Удельная теплоемкость есть отношение теплоемкости системы к ее массе. Эта величина имеет размерность

$$\dim c = M^{-1} \dim C = L^2 T^{-2} \Theta^{-1},$$

так что  $\alpha=2$ ,  $\beta=0$ ,  $2\alpha+3\beta=4$ . Следовательно,

$$1 \text{ эрг/(г}\cdot\text{К)} = 10^{-4} \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Эрг на грамм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 г теплоемкость 1 эрг/К.

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) есть отношение количества теплоты, переносимой через поверхность, нормальную вектору градиента температуры, к площади поверхности, градиенту температуры и длительности переноса:

$$\lambda = \frac{Q}{(dT/ds) St}$$

Размерность теплопроводности есть

$$\dim \lambda = LMT^{-3} \Theta^{-1}.$$

Поскольку  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$  и  $2\alpha+3\beta=5$ , получаем

$$1 \text{ эрг/(см}\cdot\text{с}\cdot\text{К)} = 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Эрг в секунду на сантиметр-кельвин равен теплопроводности вещества, в котором при поверхностной плотности теплового потока 1 эрг/(см<sup>2</sup>·с) устанавливается градиент температуры 1 К/см.

Энергетическая светимость, энергетическая освещенность есть плотность потока световой энергии у светящейся или освещенной поверхности. Единица этой величины — эрг в секунду на квадратный сантиметр:

$$1 \text{ эрг/(с}\cdot\text{см}^2) = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2.$$

Действительно, плотность потока энергии имеет размерность

$$\dim R_e = \dim E_e = L^{-2} \dim \Phi_e = MT^{-3},$$

т. е.  $\alpha=0$ ,  $\beta=1$  и  $2\alpha+3\beta=3$ .

Светимость, освещенность — это плотность нормальной составляющей светового потока у светящейся или освещенной поверхности. Размерность плотности светового потока есть

$$\dim R = \dim E = L^{-2} \dim \Phi = L^{-2} J.$$

При этом  $\alpha=-2$ ,  $\beta=0$ ,  $2\alpha+3\beta=-4$ . Таким образом, единицы светимости и освещенности равны

$$1 \text{ лм/см}^2 = 10^4 \text{ лм/м}^2 = 10^4 \text{ лк}.$$

Единица освещенности в системе СГС носит наименование фот (фот) и равна освещенности поверхности площадью в  $1 \text{ см}^2$ , на которую падает световой поток в  $1 \text{ лм}$ . Единицу светимости называют радфот.

**Яркость** есть отношение силы света в некотором направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Яркость имеет размерность

$$\dim B_{\varphi} = L^{-2} \dim I = L^{-2} J,$$

так что  $\alpha = -2$ ,  $\beta = 0$ ,  $2\alpha + 3\beta = -4$ . Следовательно, единица яркости, которую называют стильб (Сб), равна

$$1 \text{ Сб} = 1 \text{ кд/см}^2 = 10^4 \text{ кд/м}^2.$$

Стильб есть яркость светящейся поверхности площадью  $1 \text{ см}^2$  в перпендикулярном к ней направлении при силе света в  $1 \text{ кд}$ .

**Молярная теплоемкость** равна отношению количества теплоты, необходимой для нагревания вещества, к количеству этого вещества и к возрастанию его температуры. Единица этой величины — эрг на моль-кельвин — есть молярная теплоемкость вещества количеством в  $1 \text{ моль}$  при теплоемкости в  $1 \text{ эрг/К}$ . Ясно, что

$$1 \text{ эрг/(моль} \cdot \text{К)} = 10^{-7} \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

**Плотность потока ионизирующих частиц** есть отношение потока ионизирующих частиц  $dF$ , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения  $dS$  этой сферы,  $\varphi = dF/dS$ . Плотность потока частиц имеет размерность

$$\dim \varphi = L^{-2} T^{-1}.$$

Поэтому  $\alpha = -2$ ,  $\beta = 0$ ,  $2\alpha + 3\beta = -4$ , и единица плотности потока частиц равна

$$1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} = 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Эта единица есть плотность потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ см}^2$  за  $1 \text{ с}$  проникает одна частица.

**Интенсивность ионизирующего излучения** выражается в эргах в секунду на квадратный сантиметр. Размерность этой величины

$$\dim \psi = L^{-2} \dim P = MT^{-3},$$

и поскольку  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$ ,  $2\alpha + 3\beta = 3$ , получаем

$$1 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2) = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2.$$

**Поглощенная доза ионизирующего излучения** выражается в эргах на грамм и имеет размерность  $L^2 T^{-2}$ , так что  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 0$ ,  $2\alpha + 3\beta = 4$  и  $1 \text{ эрг/г} = 10^{-4} \text{ Дж/кг} = 10^{-4} \text{ Гр}$ . Эрг на грамм есть доза излучения, при которой  $1 \text{ г}$  облученного вещества поглощает энергию излучения в  $1 \text{ эрг}$ .

Заметим, что в прошлом основные единицы системы СГС — сантиметр и грамм — использовались также и не по своему прямо-

му назначению. Так, была образована единица количества теплоты — калория, определенная как количество теплоты, необходимой для нагревания 1 грамма воды на 1 градус Цельсия. Эта единица, получившая в свое время широкое распространение, в сущности была излишней. В системе СГС уже имелась единица энергии — эрг, вполне пригодная, разумеется, и в качестве единицы теплоты энергии.

Единицы такого рода никак не вписывались ни в гауссову систему, ни в расширенную систему СГС. Они чужды этим системам. В настоящее время подобные единицы относят к внесистемным. Что касается калории, то эта единица и ряд ее разновидностей согласно действующему стандарту подлежат изъятию из обращения.

## 24. ОСОБЕННОСТИ ГАУССОВОЙ СИСТЕМЫ

Очевидная особенность гауссовой системы состоит в том, что ее электрические и магнитные единицы не рассчитаны на широкое практическое применение. Действительно, такие прочно утвердившиеся в технике единицы, как ампер, вольт, ом, фарад и др., не входят в число единиц гауссовой системы и, более того, даже не относятся к ним как 10 в той или иной целой степени. Но гауссова система и сама по себе крайне неудобна на практике. Ее электрические и магнитные единицы в подавляющем большинстве:

- 1) не имеют собственных названий;
- 2) фактически лишены также обозначений через основные единицы — сантиметр, грамм и секунду — из-за громоздкости дробных показателей размерности;
- 3) не имеют и каких-либо других общепринятых наименований или обозначений (см. с. 73);
- 4) по своему размеру слишком малы, как, например, единица силы электрического тока, или слишком велики, как единица электрического сопротивления;
- 5) не допускают образования кратных и дольных единиц посредством десятичных приставок к названиям за отсутствием самих названий;
- 6) не допускают эффективного использования размерностей ввиду частого их совпадения для различных физических величин, а также из-за громоздкости дробных показателей.

Другая характерная особенность гауссовой системы, уже отмеченная ранее, состоит в соединении электрических единиц СГСЭ и магнитных единиц СГСМ. Это нередко расценивается как достоинство гауссовой системы, придающее ей симметричность. Но в сущности такое смешение единиц двух разных систем делает невозможным последовательное образование производных единиц. Необходимость искусственно стыковать два ряда единиц, электрических и магнитных, приводит к видоизменению уравнений электромагнетизма. Уравнения гауссовой системы — это не те уравнения, которые были установлены в учении об электричестве и магнетизме и из которых исходят все остальные, обладающие внутренней последовательностью системы единиц (СГСЭ, СГСМ, Международная система и др.). Как следствие, гауссова система неогерентна (несогласованна) — соотношения между ее электрическими и магнитными единицами лишены простоты, свойственной другим системам, и содержат отличные от единицы коэффициенты.

Гауссова система унаследовала от систем СГСЭ и СГСМ явно не оптимальное число основных единиц — три, а также дробные показатели размерности, доставляющие много неудобств и вызывающие известное недоумение. В гл. 6 будут раскрыты причины дробности показателей и причины несовпадения размерности одних и тех же величин в системах СГСЭ и СГСМ.

К наследству, полученному от этих систем, относится и то, что гауссова система нерационализована — расстановка коэффициентов  $4\pi$  и  $2\pi$  в ее уравнениях не соответствует симметрии рассматриваемых полей.

Как система только лишь электрических и магнитных единиц, гауссова система, разумеется, не обладает универсальностью. Этот упрек отпадает, если понимать под гауссовой системой всю совокупность единиц, основанных на сантиметре, грамме и секунде. Но в таком широком смысле, охватывая все области от механики до понизирующих излучений, система утрачивает внутреннее единство. В одной ее части (электромагнетизм) число основных единиц ограничено тремя, а показатели размерности оказываются дробными. В остальных же частях системы используется достаточное число основных единиц, а дробные показатели не появляются. Особое, и весьма невыгодное положение электромагнетизма вряд ли может быть как-либо мотивировано.

Таким образом, во многих отношениях гауссова система не соответствует современному научному уровню метрологии.

В годы, когда появилась гауссова система, не существовало других систем единиц электромагнетизма, кроме СГСМ и СГСЭ. Затруднительность выбора между двумя этими совершенно равноценными системами, возможно, и породила идею соединения их единиц. Но достоинства обеих систем при этом отнюдь не сложились, а были утрачены.

К концу XIX в. гауссова система уже получила широкое распространение.

Не одно поколение отечественных физиков воспитано на книгах, выдержанных в гауссовой системе единиц. Достаточно назвать книги таких авторов, как М. Абрагам и Р. Беккер, Я. И. Френкель, И. Е. Тамм. Можно добавить, что «Теория поля» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, первое издание которой вышло в 1939 г., также написана с использованием гауссовой системы [22].

Но ведь ничего существенно лучшего долгое время не было. Решение ввести систему МКСА было принято лишь в 1935 г. И принято оно было в лоне электротехники, а не физики, на сессии Международной электротехнической комиссии.

Не все и не сразу могли оценить систему Джорджи. Тем не менее понимание ее преимуществ быстро распространялось. Так, уже в 1941 г. Стрэттой не только применен систему МКСА в своей «Теории электромагнетизма», но и убедительно описал превосходство этой системы, впоследствии влившейся в Международную систему единиц [23].

Однако и до настоящего времени гауссова система занимает довольно сильные позиции в теоретической физике. Оказываемое ей предпочтение основано и на традициях, и на силе привычки. Но оно никак не подкреплено какими-либо реальными достоинствами гауссовой системы и находится в противоречии со всеобщей потребностью в единой системе единиц физических величин.

# СИСТЕМЫ И ЕДИНИЦЫ, ПРИМЕНЯВШИЕСЯ В ПРОШЛОМ

## 25. СИСТЕМА ХЕВИСАЙДА—ЛОРЕНЦА

Здесь и в последующих параграфах рассматриваются системы и единицы физических величин, предложенные на протяжении последних 100—150 лет, но в настоящее время не применяемые или выходящие из употребления. Некоторые из них в свое время были довольно широко распространены, а иные даже утверждены официальными актами. Другие же почти не применялись на практике.

Необходимо иметь представление об этих системах и единицах прошлого, поскольку с ними можно встретиться в прежней и современной научной литературе, а также в художественных произведениях, при изучении истории техники и т. п.

Но есть и другая причина, по которой чрезвычайно целесообразно ознакомиться с рядом систем и единиц, ныне не применяемых и частично забытых. Они позволяют проследить процесс постепенного развития и совершенствования, приведший к тому довольно высокому уровню, который достигнут в Международной системе единиц.

Первые два параграфа этой главы посвящены системам единиц электромагнетизма. Будут рассмотрены восемь систем, различающихся не только единицами, но также уравнениями и размерностью физических величин. Вместе с Международной и гауссовой системами они составляют десяток систем электрических и магнитных единиц, которые в течение примерно столетия так или иначе конкурировали между собой. В других областях, и в частности в механике, альтернативных систем единиц было значительно меньше. По-видимому, это объясняется не только и не столько относительной сложностью электромагнетизма, сколько неудачным стартом, т. е. неадекватным построением первых систем.

Система Хевисайда—Лоренца представляет собой рационализованную форму гауссовой системы. В ее названии вполне обоснованно соединены имена О. Хевисайда, выдвинувшего в 1892 г. идею рационализации системы единиц и уравнений электромагнетизма, и Х. А. Лоренца, применившего рационализованную Хевисайдом гауссову систему в своем главном труде — «Теории электронов».

В гауссовой системе и системе СГСЭ закон Кулона для взаимодействия двух электрических зарядов пишется в виде

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Соответственно напряженность и электрическое смещение (электрическая индукция) поля точечного заряда  $q$  выражаются уравнениями

$$E = F/q = q/(\epsilon r^2); \quad D = \epsilon E = q/r^2. \quad (32)$$

Поток электрического смещения через сферическую поверхность радиуса  $r$  с зарядом  $q$  в центре равен

$$4\pi r^2 D = 4\pi r^2 q/r^2 = 4\pi q,$$

чему соответствует уравнение Максвелла

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho. \quad (33)$$

Применяя уравнение (33) к плоскому конденсатору, размеры пластины которого велики по сравнению с расстоянием  $d$  между ними, при площади пластин  $S$  и поверхностной плотности заряда на них  $\rho\delta = q/S$  получают

$$DS = \epsilon ES = 4\pi q; \quad U = Ed = \frac{4\pi qd}{\epsilon S}.$$

Емкость плоского конденсатора, таким образом, выражается формулой

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon S}{4\pi d}. \quad (34)$$

Хевисайд указал на возможность придать уравнениям электромагнетизма более простой и логический вид, написав закон Кулона не в виде (17), а с коэффициентом  $4\pi$  в знаменателе:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2}. \quad (35)$$

При этом вместо уравнений (32) получаем

$$E = \frac{F}{q} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}; \quad D = \epsilon E = \frac{q}{4\pi r^2}, \quad (36)$$

что соответствует сферической симметрии поля точечного заряда. Из уравнений же (33), (34), в которых коэффициенты  $4\pi$  нельзя оправдать никакими соображениями, они исчезают:

$$\operatorname{div} D = \rho; \quad (37)$$

$$C = q/U = \epsilon S/d. \quad (38)$$

Аналогично принимают естественный вид и другие уравнения электромагнетизма, затрагиваемые рационализацией.

Рационализация уравнений, как нетрудно видеть, влечет за собой изменение числовых значений некоторых физических величин и соответствующее изменение размера их единиц. Числовые значения и единицы механических величин, например силы  $F$  и расстояния  $r$ , разумеется, не изменяются. Поэтому введение коэффициента  $4\pi$  в знаменатель закона Кулона (35) приводит к увеличению числовых значений электрических зарядов  $q_1, q_2$  в  $\sqrt{4\pi}$  раз. Следовательно, в системе Хевисайда—Лоренца единица электрического заряда в  $\sqrt{4\pi} \approx 3,545$  раза меньше, чем в гауссовой системе и СГСЭ.

Далее, согласно уравнениям (36)—(38), заменяющим уравнения (32)—(34), числовые значения  $D, E$  и  $U = Ed$  уменьшаются в  $\sqrt{4\pi}$  раз, а числовые значения  $C$  увеличиваются в  $4\pi$  раз, поскольку числовое значение  $q$  увеличивается в  $\sqrt{4\pi}$  раз, а числовое значение  $U$  во столько же раз уменьшается. Соответственно размер единиц смещения, напряженности электрического поля и напряжений (потенциала, э. д. с.) увеличивается в  $\sqrt{4\pi}$  раз, а единица емкости в систе-

ме Хевисайда—Лоренца оказывается в 4π раз меньше, чем в системах СГСЭ и гауссовой.

Уравнения системы Хевисайда—Лоренца приведены в табл. П12, П14. Сравнивая их с уравнениями гауссовой системы, приведенными там же, нетрудно выяснить, как изменяются размер единиц и числовые значения также и других физических величин при рационализации. Мы не будем здесь излагать до конца этот анализ.

Полное рассмотрение процедуры рационализации целесообразно провести применительно к Международной системе единиц, что и будет сделано в § 34. Кстати, результаты рационализации в СИ выглядят существенно иначе, чем в системе Хевисайда—Лоренца.

Система единиц и уравнений Хевисайда—Лоренца имела лишь весьма ограниченное применение. Рационализованность системы не котировалась как ее заметное преимущество. В остальном же в системе Хевисайда—Лоренца сохранились все особенности, свойственные гауссовой системе, и в частности дробные показатели и совпадения размерности разных физических величин. Переход к рационализованной системе не оправдывался и какими-либо ее практическими преимуществами. Предпочтение было отдано гауссовой системе в нерационализованной («классической») форме.

## 26. СИСТЕМЫ СГСЭ, СГСМ, СГС<sub>ε<sub>0</sub></sub>, СГС<sub>μ<sub>0</sub></sub>, СГСФ, СГСБ

Шесть систем единиц электромагнетизма, рассматриваемых в этом параграфе, родственны между собой и родственны гауссовой системе. А точнее, гауссова система родственна им, поскольку ее электрические единицы взяты из системы СГСЭ и магнитные единицы — из системы СГСМ. Международные обозначения шести систем — CGSE, CGSM, CGS<sub>ε<sub>0</sub></sub>, CGS<sub>μ<sub>0</sub></sub>, CGSF, CGSB.

Основными единицами всех шести систем, как видно и из их названий, являются сантиметр, грамм и секунда — единицы длины, массы и времени. Системы СГСЭ и СГСМ, как и гауссова система, построены только на этих трех основных единицах. В остальных системах добавлено еще по одной, четвертой основной единице.

Все шесть рассматриваемых систем в отличие от гауссовой исходят из целостной системы уравнений электромагнетизма (12) — (14), что придает этим системам внутреннюю последовательность (согласованность).

Уравнения шести систем, как и гауссовой системы, пишутся в нерационализованной форме.

Единицы рассматриваемых систем мало удобны на практике. В большинстве они или слишком малы, или слишком велики и к тому же не имеют ни собственных наименований, ни общепринятых обозначений.

В системах СГСЭ, СГС<sub>ε<sub>0</sub></sub> и СГСФ, образующих группу так называемых электростатических систем, принято

$$\epsilon_0 = 1; \quad \mu_0 = 1/c^2. \quad (39)$$

А в системах СГСМ, СГС<sub>μ<sub>0</sub></sub> и СГСБ, входящих в группу электромагнитных систем, принято

$$\mu_0 = 1; \quad \epsilon_0 = 1/c^2. \quad (40)$$

Разумеется, в обоих случаях только одна из постоянных  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  выбрана произвольно, другая же установлена в соответствии с равенством (15). В результате выбора одинаковых значений  $\epsilon_0 = 1$  (39) для

трех электростатических систем СГСЭ, СГС $\epsilon_0$  и СГСФ соответствующие производные единицы этих систем одинаковы. Точно так же в результате выбора  $\mu_0=1$  (40) электромагнитные системы СГСМ, СГС $\mu_0$  и СГСБ имеют общие производные единицы. Но единицы электромагнитных систем, разумеется, не совпадают с единицами электростатических систем.

Системы СГСЭ и СГСМ, как уже отмечалось, были разработаны комиссией под руководством Максвелла, а затем одобрены и утверждены Первым Международным конгрессом электриков в 1881 г. Остальные системы официального признания не получили.

Несмотря на указанные выше многочисленные общие черты, рассматриваемые шесть систем делятся на три пары, существенно различающиеся между собой, — СГСЭ и СГСМ, СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$ , наконец, СГСФ и СГСБ. Но прежде чем переходить к этим отличиям, необходимо определить те из единиц шести систем, которые не были определены ранее.

В § 20 были определены электрические единицы гауссовой системы, совпадающие с соответствующими единицами системы СГСЭ, а следовательно, и систем СГС $\epsilon_0$ , СГСФ. Затем в § 21 были определены магнитные единицы гауссовой системы, совпадающие с единицами систем СГСМ, СГС $\mu_0$  и СГСБ. Теперь остается определить магнитные единицы СГСЭ (а также и СГС $\epsilon_0$ , СГСФ) и электрические единицы СГСМ (совпадающие с единицами СГС $\mu_0$ , СГСБ).

В качестве определяющих уравнений для образования магнитных единиц СГСЭ используем уравнения (13) и (14), которые перепишем в несколько ином порядке:

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{F}{Il}; & \Phi &= BS; & \Psi &= n\Phi; & L &= \frac{\Psi}{I}; \\ \mu_0 &= \frac{1}{\epsilon_0 c^2}; & H &= \frac{B}{\mu_0 \mu}; & F_m &= \oint H dl; \\ R_m &= \frac{F_m}{\Phi}. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Вследствие когерентности системы СГСЭ ее магнитные единицы определяются из уравнений (41) без тех затруднений, с которыми было сопряжено определение магнитных единиц гауссовой системы. Напомним, что индексы «э», «м», «и» указывают на принадлежность к системам СГСЭ, СГСМ, СИ.

Учитывая размер единицы силы тока (19), последовательно находим

$$\begin{aligned} [B]_э &= \frac{[F]}{[l]_э [I]} \approx \frac{10^{-5} \text{ ньютон}}{(1/3) 10^{-9} \text{ ампер} \cdot 0,01 \text{ метр}} = 3 \cdot 10^6 \text{ тесла}; \\ [\Phi]_э &= [\Psi]_э = [B]_э [S] \approx 3 \cdot 10^6 \text{ тесла} \cdot 10^{-4} \text{ квадратных метров} = \\ &= 300 \text{ вебер}; \\ [L]_э &= \frac{[\Psi]_э}{[I]_э} \approx \frac{300 \text{ вебер}}{(1/3) 10^{-9} \text{ ампер}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ генри}; \\ \frac{[H]_э}{[H]_и} &= \frac{\{H\}_и}{\{H\}_э} = \frac{\{B\}_и \{\mu_0\}_э}{\{B\}_э \{\mu_0\}_и} = \frac{[B]_э \{\mu_0\}_э}{[B]_и \{\mu_0\}_и} \approx \end{aligned}$$



$$\approx \frac{3 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = \frac{10^{-7}}{12\pi}; \quad (42)$$

$$[H]_э \approx \frac{10^{-7}}{12\pi} \text{ ампер на метр} \approx 2,65 \cdot 10^{-9} \text{ ампер на метр};$$

$$[F_m]_э = [H]_э [l] \approx \frac{10^{-7} \text{ ампер}}{12\pi \text{ метр}} \cdot 0,01 \text{ метр} = \frac{10^{-9}}{12\pi} \text{ ампер};$$

$$[R_m]_э = \frac{[F_m]_э}{[\Phi]_э} \approx \frac{10^{-9}}{12\pi} \text{ ампер} \cdot \frac{1}{300 \text{ вебер}} = \frac{10^{-11}}{36\pi} \text{ генри}^{-1}.$$

Электрические единицы системы СГСМ (а также систем СГС $\mu_0$  и СГСБ) образуются посредством определяющих уравнений (12) и (14). Используем их лишь частично, написав в следующем порядке:

$$I = F/(Bl); \quad q = It; \quad \varphi = U = \mathcal{E} = A/q; \quad E = F/q = U/s;$$

$$C = q/U; \quad R = U/I; \quad G = 1/E; \quad D = \epsilon_0 \epsilon E.$$

Размер единицы магнитной индукции — гаусса — был найден ранее, см. равенство (26). Снова без каких-либо трудностей, ввиду когерентности системы СГСМ, получаем последовательно:

$$[I]_м = \frac{[F]}{[B]_м [l]} = \frac{\text{дина}}{\text{гаусс} \cdot \text{сантиметр}} = \frac{10^{-5} \text{ ньютон}}{10^{-4} \text{ тесла} \cdot 0,01 \text{ метр}} = 10 \text{ ампер};$$

$$[q]_м = [I]_м [t] = 10 \text{ ампер} \cdot \text{секунда} = 10 \text{ кулон};$$

$$[\varphi]_м = [U]_м = [\mathcal{E}]_м = \frac{\text{эрг}}{[q]_м} = \frac{10^{-7} \text{ джоуль}}{10 \text{ кулон}} = 10^{-8} \text{ вольт};$$

$$[E]_м = \frac{[U]_м}{[s]} = \frac{10^{-8} \text{ вольт}}{0,01 \text{ метр}} = 10^{-6} \text{ вольт на метр};$$

$$[C]_м = \frac{[q]_м}{[U]_м} = \frac{10 \text{ кулон}}{10^{-8} \text{ вольт}} = 10^9 \text{ фарад};$$

$$[R]_м = \frac{[U]_м}{[I]_м} = \frac{10^{-8} \text{ вольт}}{10 \text{ ампер}} = 10^{-9} \text{ ом};$$

$$[G]_м = \frac{1}{[R]_м} = \frac{1}{10^{-9} \text{ ом}} = 10^9 \text{ сименс};$$

$$\begin{aligned} \frac{[D]_м}{[D]_и} &= \frac{\{D\}_и}{\{D\}_м} = \frac{\{E\}_и \{\epsilon_0\}_и}{\{E\}_м \{\epsilon_0\}_м} = \frac{[E]_м \{\mu_0 c^2\}_м}{[E]_и \{\mu_0 c^2\}_и} = \\ &= \frac{10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{20}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{16}} = \frac{10^5}{4\pi}; \end{aligned} \quad (43)$$

$$[D]_м = \frac{10^5}{4\pi} [D]_и = \frac{10^5}{4\pi} \text{ кулон на квадратный метр}.$$

Единица силы тока в системе СГСМ носит название био (Био,

Віо). Можно заметить, что полученные здесь соотношения между электрическими единицами системы СГСМ и СИ просто повторяют определения абсолютных практических единиц, установленных для практических нужд в 1881 г. на Первом Международном конгрессе электриков в Париже. Лишь много позже эти единицы оказались включенными в Международную систему единиц.

Перейдем к различиям между рассматриваемыми системами единиц. Диэлектрическая проницаемость в системе СГСЭ и магнитная проницаемость в системе СГСМ считаются безразмерными величинами (отвлеченными числами), для вакуума равными единице. Системы СГСЭ и СГСМ, а также гауссова система, заимствовавшая их единицы, построены только на трех основных единицах — сантиметре, грамме и секунде.

Однако со временем вместе с осознанием невозможности свести электромагнитные явления к механике стала проявляться тенденция строить системы единиц электромагнетизма не на трех, а на четырех основных единицах, добавляя к единицам длины, массы и времени ту или иную электрическую или магнитную единицу.

В системе СГС $\epsilon_0$  вместе с сантиметром, граммом и секундой за основную единицу принята абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума  $\epsilon_0$ . В системе СГС $\mu_0$  в качестве четвертой основной единицы принята абсолютная магнитная проницаемость вакуума  $\mu_0$ . Соответственно размерности электрических и магнитных единиц в этих системах выражаются в виде

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma \epsilon^\delta; \quad \dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma \mu^t,$$

где  $\epsilon = \dim \epsilon_0$ ,  $\mu = \dim \mu_0$  — символы, обозначающие размерность абсолютной диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Закон Кулона для электрических зарядов в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  принимает соответственно вид

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_0 \epsilon r^2}; \quad F = \frac{\mu_0 c^2 q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Следовательно, электрический заряд в этих системах обладает размерностью

$$\dim q = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{1/2}; \quad \dim q = L^{1/2} M^{1/2} \mu^{-1/2}. \quad (44)$$

Поскольку в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  постоянные  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  приняты соответственно за основные единицы, закон Кулона в этих системах обычно пишут в упрощенном виде:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}; \quad F = \frac{c^2 q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Аналогично опускают  $\epsilon_0$  или  $\mu_0$  и в других уравнениях этих систем, а также в уравнениях рассматриваемых ниже систем СГСФ и СГСБ, где числовые значения  $\epsilon_0$  и соответственно  $\mu_0$  также равны единице. В результате уравнения систем СГС $\epsilon_0$ , СГСФ и СГС $\mu_0$ , СГСБ не отличаются от соответствующих уравнений систем СГСЭ и СГСМ. Разумеется, из упрощенных таким образом уравнений нельзя корректно определять размерность физических величин.

Размерность электрических и магнитных величин в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  по указанным причинам приходится находить, исходя из полученной выше размерности электрического заряда (44) и из

определяющих уравнений (12) — (15). Так, размерности силы тока, напряженности электрического поля, смещения и емкости в системе СГС $\epsilon_0$  имеют вид

$$\dim I = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2};$$

$$\dim E = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{-1/2};$$

$$\dim D = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{1/2};$$

$$\dim C = L\epsilon.$$

Размерности величин электромагнетизма в системах СГС $\epsilon_0$ , СГС $\mu_0$  приведены в табл. П16, П17. Нетрудно видеть, что простым вычеркиванием символов  $\epsilon$  и  $\mu$  из выражений размерности в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  получается размерность тех же величин в системах СГСЭ и СГСМ.

Как уже отмечалось, для каждой из физических величин единицы систем СГСЭ и СГС $\epsilon_0$  одинаковы; совпадают и единицы систем СГСМ и СГС $\mu_0$ . Уравнения электромагнетизма во всех этих системах одни и те же. Таким образом, системы СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  ничем, кроме записи выражений размерности, не отличаются от систем СГСЭ и СГСМ.

Однако это ничтожное, казалось бы, различие в действительности очень существенно. В полной мере его последствия будут рассмотрены в гл. 6. Здесь ограничимся лишь указанием на то, что в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  в отличие от СГСЭ и СГСМ нет частых совпадений размерности разнородных физических величин. В частности, как видно из табл. П16 и П17, различны размерности электрического смещения и напряженности электрического поля. Аналогично различаются размерности магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Электрическая емкость в системе СГС $\epsilon_0$  не имеет размерности длины, а индуктивность в системе СГС $\mu_0$  не выражается в сантиметрах, как в системах СГСЭ, СГСМ и гауссовой.

И все же добавление четвертой основной единицы в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  не решило всех проблем. Так, сохранились в неприкосновенности дробные показатели размерности.

Перейдем к последней паре систем — СГСФ и СГСБ. По своему строению они весьма близки к системе Джорджи (МКСА), см. § 5.

В системе СГСФ в качестве четвертой основной единицы, в добавление к сантиметру, грамму и секунде, выбран франклин — единица электрического заряда электростатической системы СГСЭ. Благодаря такому выбору и для всех остальных электрических и магнитных величин совпадают единицы систем СГСФ, СГСЭ и СГС $\epsilon_0$ . Четвертой основной единицей системы СГСБ является био — единица силы тока в электромагнитной системе СГСМ, поэтому одинаковы соответствующие электрические и магнитные единицы также и в другой тройке систем — СГСБ, СГСМ и СГС $\mu_0$ . Все шесть систем не отличаются одна от другой и своими уравнениями. Единственное отличие пары систем СГСФ и СГСБ от предыдущих четырех систем единиц — в размерности физических величин и их единиц.

В системах СГСФ и СГСБ нет дробных показателей размерности. Все показатели размерности получаются целочисленными (см. табл. П16, П17). Более того, размерность всех электрических и магнитных величин в системе СГСБ в точности такая же, как в МКСА и Международной системе единиц. Она выражается через размер-

ность длины, массы, времени и силы тока:

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta. \quad (45)$$

Размерность физических величин в системе СГСФ отличается от выражения (45) лишь заменой символа силы тока  $I$  на  $T^{-1}Q$ , где  $Q$  — символ, обозначающий размерность электрического заряда:

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^{\gamma-\delta} Q^\delta. \quad (46)$$

Выражением (45) можно воспользоваться для нахождения размера электрических и магнитных единиц системы СГСБ, а следовательно, и систем СГСМ, СГС $\mu_0$ . В системе СГСБ единица силы тока, био, равна 10 А, а единицы длины и массы, сантиметр, и грамм, соответственно в  $10^2$  и  $10^3$  раз меньше метра и килограмма — единиц СИ. Поэтому производные единицы электромагнетизма в системах СГСБ, СГСМ и СГС $\mu_0$  в

$$\tau = 10^{2\alpha+3\beta-\delta} \quad (47)$$

раз меньше, чем в Международной системе единиц.

Например, в табл. П17 для магнитной индукции находим  $\alpha=0$ ,  $\beta=1$ ,  $\delta=-1$ . Следовательно,  $2\alpha+3\beta-\delta=4$ , и единица магнитной индукции гаусс, в  $\tau=10^4$  раз меньше тесла. Для магнитного потока  $\alpha=2$ ,  $\beta=1$ ,  $\delta=-1$ ,  $2\alpha+3\beta-\delta=8$ , так что максвелл в  $10^8$  раз меньше вебера. Для сопротивления  $\alpha=2$ ,  $\beta=1$ ,  $\delta=-2$ ;  $2\alpha+3\beta-\delta=9$ , и единица сопротивления СГСБ в  $10^9$  раз меньше ома.

Аналогично можно использовать выражение размерности (46) для нахождения размера единиц в системах СГСФ, СГСЭ и СГС $\epsilon_0$ . Поскольку единица заряда, франклин, равна  $(1/3) \cdot 10^{-9}$  Кл, производные единицы электромагнетизма в этих системах в

$$\tau \approx 3^\delta \cdot 10^{2\alpha+3\beta+9\delta} \quad (48)$$

раз меньше, чем в Международной системе единиц. Например, согласно табл. П16 для потенциала и напряжения  $\alpha=2$ ,  $\beta=1$ ,  $\delta=-1$ ;  $2\alpha+3\beta+9\delta=-2$ . Следовательно, единица потенциала и напряжения в системах СГСФ, СГСЭ и СГС $\epsilon_0$  в  $\tau \approx (1/3) \cdot 10^{-2}$  раз меньше единицы СИ, т. е. равна 300 В.

Таким образом, размер единиц всех шести систем СГС, вычисленный выше другими способами, может быть автоматически определен по размерности этих единиц (45), (46) посредством равенств (47) и (48). Однако эти равенства неприменимы к единицам электрического смещения  $D$  и напряженности магнитного поля  $H$ , поскольку эти единицы изменены при придании СИ рационализованной формы (см. § 34).

Отсутствие дробных показателей размерности в системах СГСФ и СГСБ весьма примечательно. С одной стороны, целочисленность показателей и одинаковость размерности величин в системах СГСБ и МКСА не должны вызывать удивления, поскольку эти две системы явно родственны. Действительно, практические единицы электромагнетизма, вошедшие в МКСА и СИ, первоначально были образованы «волевым» решением из единиц системы СГСМ, с которыми совпадают единицы СГСБ. Но, с другой стороны, родство между СГСБ, СГСФ и другими системами СГС, включая гауссову систему и систему Хевисайда—Лоренца, определено более тесное. Все они объединены идентичным выбором постоянных  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  (39), (40), общими единицами и происхождением одной от другой. И тем не менее раз-

мерность электрических и магнитных величин в этих системах существенно различна.

Целесообразно упомянуть еще одну систему единиц, в свое время обсуждавшуюся, а ныне почти полностью забытую. Как отмечалось в § 5, при разработке системы Джорджи в качестве четвертой основной единицы в конечном счете был выбран ампер, и система получила название МКСА. Но вначале рассматривались и другие возможности. Предполагали остановить выбор на единице заряда — кулоне, или на единице сопротивления — оме, или, по аналогии с системой СГС $\mu_0$ , на абсолютной магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ , для которой было найдено и наименование — магн. В построенной таким путем системе МКСМ электрические и магнитные единицы имели бы ту же размерность, что и в системе СГС $\mu_0$ , с теми же дробными показателями. Однако тот или иной выбор четвертой основной единицы, разумеется, никак не затронул бы размера единиц и вида уравнений электромагнетизма, которые оставались такими же, как и в МКСА. Все различие между системами МКСМ и МКСА заключалось бы только в размерности электрических и магнитных величин.

## 27. СИСТЕМЫ МТС И МКГСС

**Система МТС.** В области механики и акустики нет того многообразия систем единиц, которое наблюдалось в области электромагнетизма. Помимо систем СГС и МКС, из которых последняя вошла как составная часть в Международную систему, на практике применялись еще только две системы — МТС и МКГСС.

Система МТС охватывает лишь единицы механики и акустики, на другие же области явлений не распространяется. Она построена на трех основных единицах:

- метр — единица длины,
- тонна — единица массы,
- секунда — единица времени.

Таким образом, в системе МТС, как и в СГС и МКС, основными являются единицы длины, массы и времени. Во всех трех системах определяющие уравнения одинаковы. Полностью совпадают и размерности механических и акустических величин. Отличаются эти три системы одна от другой только размерами единиц.

Из основных единиц МТС одна лишь единица массы — тонна — отличается от соответствующей единицы МКС — килограмма. Поскольку размерности величин имеют вид

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma$$

и тонна в  $10^3$  раз больше килограмма, производные единицы МТС в

$$\tau_1 = 10^{3\beta} \quad (49)$$

раз больше соответствующих единиц МКС и Международной системы. Впрочем, в каждом случае это отличие нетрудно проследить и непосредственно.

Так, единицы силы и давления в системе МТС, носящие название стен (сн) и пьеза (пз), в 1000 раз больше единиц Международной системы:

$$1 \text{ сн} = 10^3 \text{ Н}; \quad 1 \text{ пз} = 10^3 \text{ Н/м}^2.$$

Для единиц энергии и мощности  $\beta=1$ , как и для единиц силы и давления. В системе МТС они также в  $10^3$  раз больше единиц энергии и мощности СИ, почему и носят название килоджоуль и киловатт.

Система МТС подходила для тех отраслей народного хозяйства, где имеют дело с большими массами материалов. Ее именовали иногда «промышленной» системой единиц. Система МТС удобна и тем, что плотности веществ в ней имеют те же значения, что и в системе СГС. Действительно, и единица массы, и единица объема МТС в  $10^6$  раз больше, чем соответствующие единицы СГС, так что  $1 \text{ т/м}^3 = 1 \text{ г/см}^3$ . В частности, плотность воды в обеих системах численно равна приблизительно единице.

Система МТС первоначально была предложена во Франции, узаконена там в 1919 г. и применялась длительное время. В Советском Союзе система МТС была принята и согласно действовавшему стандарту применялась с 1933 по 1955 г.

Однако несмотря на некоторые преимущества эта система не имела будущего. Крупный масштаб единиц затруднял ее использование в большинстве отраслей производства. Главный же порок системы МТС заключался в невозможности ее распространения на область электромагнетизма, где она не стыковалась с широко применяемыми практическими электрическими и магнитными единицами.

**Система МКГСС.** Эта система появилась во второй половине XIX в. в связи с практической потребностью в единицах более удобного размера, чем слишком малые единицы системы СГС. Отсюда и второе название этой системы единиц — техническая система.

Основными единицами системы МКГСС являются:

- метр — единица длины,
- килограмм-сила — единица силы,
- секунда — единица времени.

Это единственная система механических и акустических единиц, в которой в качестве одной из основных принята единица силы. Согласно определению килограмм-сила есть вес тела с массой 1 килограмм при нормальных условиях. Вес тела равен произведению его массы на ускорение свободного падения  $g$ :

$$F = mg.$$

Нормальное значение  $g$  принято в точности равным

$$g_H = 9,80665 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом,

$$1 \text{ кгс} = g_H \cdot 1 \text{ кг} = 9,80665 \text{ Н}.$$

В отличие от размерности в других системах механики, имеющей общий вид

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma,$$

размерность величин в системе МКГСС выражается в виде

$$\dim Z = L^p F^q T^r,$$

где  $F$  — символ размерности силы. Из выражения

$$F = LMT^{-2}$$

получаем размерность массы:

$$\dim m = M = L^{-1} FT^2.$$

Следовательно,

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma = L^{\alpha-\beta} F^\beta T^{\gamma+2\beta}, \quad (50)$$

т. е.

$$p = \alpha - \beta, \quad q = \beta, \quad r = \gamma + 2\beta.$$

Например, как и непосредственно видно, размерности энергии, мощности и давления в системе МКГСС выражаются следующим образом:

$$\dim W = LF, \quad \dim P = LFT^{-1}, \quad \dim p = L^{-2} F.$$

Техническую единицу массы (т. е. м.) иногда называют инертой. Она равна

$$1 \text{ т. е. м.} = \frac{1 \text{ кгс}}{1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}} = 9,80665 \text{ кг.}$$

Единицы энергии и мощности, килограммометр и килограммометр в секунду, и единица давления в системе МКГСС равны

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ Дж}; \quad 1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{с} = 9,80665 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 10^{-4} \text{ ат} = 9,80665 \text{ Па.}$$

В СССР техническая система была установлена ГОСТ 7664—61 и долгое время имела преимущественное применение в технике.

Недостаток системы МКГСС заключен в фактическом непостоянстве ее основной единицы — килограмм-силы, определенной как  $g_n$ -килограмм. Ускорение свободного падения  $g$  не равно обычно  $g_n$  и зависит от географической широты места, от высоты над уровнем моря и от других факторов, колеблясь в пределах до 0,2 %. Измерять точное значение  $g$  и вносить соответствующие поправки на практике нет возможности. За килограмм-силу приходится принимать просто вес тела массой 1 кг в местных реально существующих, а не в принятых нормальных условиях.

Техническая система неудобна и тем, что ее единицы не находятся в десятичных соотношениях с единицами других систем. Но решающим обстоятельством, в силу которого техническая система вышла из употребления, была ее явная непригодность в каких-либо других областях, кроме механики и акустики.

## 28. ЕСТЕСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

В теоретической физике иногда используют так называемые естественные системы единиц — системы, в которых основными единицами служат те или иные физические константы.

**Система Планка.** Первая естественная система единиц была предложена Планком в 1906 г. Ее основными единицами являются: скорость света в вакууме  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$ , гравитационная постоянная  $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ , постоянная Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ , постоянная Больцмана  $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$ .

Система Планка предназначена для области механики и теплоты.

Чтобы определить единицы длины, массы, времени и термодинамической температуры  $[l]$ ,  $[m]$ ,  $[t]$ ,  $[T]$  в этой системе, выразим через них основные единицы. Учитывая когерентность системы Планка, по-

лучаем уравнения

$$c = \frac{[l]}{[t]}; \quad G = \frac{[l]^3}{[m][t]^2}; \quad h = \frac{[l]^2[m]}{[t]}; \quad k = \frac{[l]^2[m]}{[t]^2[T]}.$$

Из этой системы уравнений, подставляя размеры основных единиц, находим:

$$\begin{aligned} \text{единица длины } [l] &= \sqrt{Gh/c^3} = 4,05 \cdot 10^{-35} \text{ м,} \\ \text{единица массы } [m] &= h/(c[l]) = 5,46 \cdot 10^{-8} \text{ кг,} \\ \text{единица времени } [t] &= [l]/c = 1,351 \cdot 10^{-43} \text{ с,} \\ \text{единица термодинамической температуры } [T] &= ch/(k[l]) = 3,55 \times \\ &\times 10^{32} \text{ К.} \end{aligned}$$

Система Хартри, применяемая в атомной физике, охватывает единицы механики и электромагнетизма. Как и в гауссовой системе, в системе Хартри принято  $\epsilon_0 = 1$  и соответственно только три основные единицы:

$$\begin{aligned} \text{заряд электрона } e &= 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл,} \\ \text{масса покоя электрона } m_e &= 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг,} \\ \text{постоянная Планка } \hbar &= h/2\pi = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.} \end{aligned}$$

При этом закон Кулона и постоянная тонкой структуры выражаются равенствами

$$F = q_1 q_2 / r^2; \quad \alpha = e^2 / (\hbar c) = 1/137.$$

Выразим заряд электрона и постоянную Планка через единицы длины, массы и времени:

$$e^2 = [l]^2 [F] = \frac{[l]^3 m_e}{[t]^2}; \quad \hbar = \frac{[l]^2 m_e}{[t]}.$$

Из этих уравнений находим:

$$\begin{aligned} \text{единица длины } [l] &= \hbar^2 / (m_e e^2) = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м,} \\ \text{единица времени } [t] &= \hbar^3 / (m_e e^4) = 2,42 \cdot 10^{-17} \text{ с и далее} \\ \text{единица скорости } [v] &= [l]/[t] = e^2 / \hbar = 2,19 \cdot 10^8 \text{ м/с,} \\ \text{единица энергии } [W] &= m_e e^4 / \hbar^2 = 4,36 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 27,2 \text{ эВ,} \\ \text{единица силы тока } [I] &= e/[t] = 6,62 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \end{aligned}$$

В системе Хартри, как можно видеть,

$$[l] = a_1; \quad [v] = \alpha c = c/137; \quad [W] = e^2/a_1 = 2Ry,$$

т. е. единица длины равна радиусу первой боровской орбиты, скорость света в вакууме равна 137 единицам скорости, единица энергии есть удвоенный ридберг (удвоенная энергия нормального состояния атома водорода).

Релятивистская система единиц используется в квантовой электродинамике. В этой системе  $\epsilon_0 = 1$ , как в гауссовой системе, и также только три основные единицы:

$$\begin{aligned} \text{скорость света в вакууме } c &= 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с,} \\ \text{масса покоя электрона } m_e &= 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг,} \\ \text{постоянная Планка } \hbar &= 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.} \end{aligned}$$

Таким образом, релятивистская система отличается от системы Хартри лишь выбором одной из основных единиц — скорости света в вакууме вместо заряда электрона. Выразив скорость света в вакууме и постоянную Планка через единицы длины, массы и времени

$$c = \frac{[l]}{[t]}; \quad \hbar = \frac{[l]^2 m_e}{[t]},$$



найдем:

единица длины  $[l] = \hbar / (m_e c) = 3,86 \cdot 10^{-13}$  м,

единица времени  $[t] = \hbar / (m_e c^2) = 1,288 \cdot 10^{-21}$  с,

единица энергии  $[W] = m_e c^2 = 8,19 \cdot 10^{-14}$  Дж = 0,511 МэВ,

единица электрического заряда  $[q] = \sqrt{\hbar c} = \sqrt{137} e = 1,876 \times 10^{-18}$  Кл,

единица силы электрического тока  $[I] = [q] / [t] = 1,456 \cdot 10^3$  А.

В релятивистской системе единица энергии равна энергии покоя электрона, а единица электрического заряда в  $\sqrt{137} = 11,71$  раза больше заряда электрона; единица длины есть комптоновская длина волны электрона  $\lambda_c$ .

Релятивистскую систему и систему Хартри нетрудно распространить и на тепловые явления, введя в число основных единиц постоянную Больцмана  $k$ . Единицы термодинамической температуры будут при этом равны  $[T] = m_e [l]^2 / ([t]^2 k)$  соответственно.

Единицы естественных систем большей частью чрезвычайно малы или, напротив, очень велики по сравнению с величинами, встречающимися в повседневной жизни. В этом отношении естественные единицы выглядят весьма необычно и как бы противоречат своему названию.

Применение естественных систем единиц может быть оправдано лишь в довольно узкой области — при построении и изложении фундаментальных физических теорий. Считается, что использование естественных единиц позволяет придать физическим законам более простой вид.

Действительно, некоторые формулы при естественных единицах упрощаются, освобождаясь от числовых коэффициентов. Так, в системе Планка закон всемирного тяготения может быть написан в одном из двух вариантов:

$$F = [G] m_1 m_2 / r^2; \quad F = m_1 m_2 / r^2.$$

В первом варианте  $[G]$  есть единица с размерностью гравитационной постоянной, и полностью сохранен физический характер уравнения, формулирующего физический закон. Однако обычно используют второй вариант, в котором единица  $[G]$  опущена, и уравнение из физического фактически превращено в числовое.

Таким образом, упрощение формулировки физических законов при использовании естественных систем единиц покупается ценой подмены физических уравнений числовыми. Числовые уравнения связывают между собой не сами физические величины, а лишь их числовые значения в применяемых единицах. Утрачивается возможность сопоставления и проверки размерности рассматриваемых физических величин. Ввиду сохранения прежних буквенных обозначений подмена физических уравнений числовыми оказывается замаскированной и возникает иллюзия оперирования с подлинными физическими величинами и уравнениями. Возрастает абстрактность используемых уравнений и теории в целом.

Гораздо более плодотворно, по-видимому, введение безразмерных величин, таких как отношение скорости частицы к скорости света в вакууме  $\beta = v/c$  и т. п. Упрощая формулировку физических закономерностей без утраты их наглядности, безразмерные переменные широко применяются в различных областях теории и техники.

## 29. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

Внесистемными называют единицы, не входящие ни в одну из систем единиц. Этому определению, обычно приводимому в литературе, вполне отвечают такие единицы, как световой год, миллиметр ртутного столба, лошадиная сила и т. п. Названия многих из внесистемных единиц довольно своеобразны. Оказывается, что давление измеряют миллиметрами, расстояние — годами, мощность — единицами силы.

Внесистемные единицы появлялись большей частью независимо друг от друга, восполняя отсутствие единиц в тех или иных областях науки и производства, а иногда и отсутствие удобных по размеру единиц. Многие из внесистемных единиц, например сило-час, калория, кюри, в прошлом имели широкое распространение. Ряд единиц и по настоящее время находит практическое применение, а некоторые допущены действующим стандартом наравне с единицами Международной системы.

Несмотря на ясность приведенного выше определения в литературе нередко от него отходят. Раньше к внесистемным причисляли кратные и дольные единицы, образуемые с помощью десятичных приставок. Внесистемными стали называть и единицы систем, ныне вышедших из употребления, например килограмм-силу и другие единицы технической системы. Относительные и логарифмические единицы также причисляют к внесистемным. Наконец, проявляется тенденция относить к внесистемным единицы, не входящие в ту или иную конкретную систему единиц. ГОСТ 8.417—81 называет внесистемной единицей даже тонну, равную  $10^3$  кг, по-видимому, только вследствие ее «внесистемного» названия.

Чтобы выяснить, что же следует считать внесистемными единицами, уточним в соответствии с ГОСТ 8.417—81, какие категории единиц входят в Международную систему.

Пункт 1.1 стандарта (с. 2) гласит: «Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц, а также десятичные кратные и дольные от них». Тем самым десятичные кратные и дольные единицы, образуемые с помощью установленных множителей и приставок, включены в число системных единиц.

Согласно пп. 1.1 и 3.1, 3.2 (с. 12 стандарта) допускается применять без ограничения срока наравне с единицами СИ относительные и логарифмические единицы за исключением единицы непер, а также 18 единиц, перечисленных в табл. 6 на с. 13 и 14 стандарта.

Таким образом, наряду с основными, дополнительными и производными единицами в Международную систему входят десятичные кратные и дольные единицы, образуемые посредством установленных приставок, а также, на полных правах, относительные и логарифмические единицы. Все эти категории единиц на практике уже не относятся к внесистемным.

Фактически включены в Международную систему и 18 единиц, приведенных в табл. 6 стандарта, в том числе 5 типично внесистемных единиц: астрономическая единица, световой год, парсек, атомная единица массы и электрон-вольт.

Целесообразно было бы, по мнению авторов, несколько расширить категорию десятичных кратных и дольных единиц Международной системы, включив в нее ряд единиц со специальными наименованиями.

Полноправными единицами СИ тогда могли бы стать бар

( $10^5$  Па), микрон ( $10^{-6}$  м), бэр (0,01 Зв), центнер (100 кг) и др., а также некоторые единицы гауссовой системы и системы СГС — максвелл ( $10^{-8}$  Вб), гаусс ( $10^{-4}$  Тл), дина ( $10^{-5}$  Н), эрг ( $10^{-7}$  Дж) и др.

Таких единиц с внесистемными названиями — около трех десятков. Предлагаемые добавления, несколько смягчая свойственную СИ жесткую регламентацию, обогатили бы Международную систему единиц подобно тем небольшим неправильностям, которые украшают всякий живой язык. Разумеется, только практика может показать, какие из добавляемых единиц окажутся действительно полезными и привьются.

Ниже приводится перечень наиболее известных внесистемных единиц с их определениями. Единицы со внесистемными названиями выделены в отдельный список, помещенный в конце этого параграфа. Единицы, допущенные стандартом к применению наравне с единицами СИ, отмечены звездочкой (\*).

Апостильб (асб) — единица яркости;  $1 \text{ асб} = 10^{-4}/\pi \text{ сб} = 1/\pi \text{ кд/м}^2$ .

Астрономическая единица\* (а. е., ае) — среднее расстояние от Солнца до Земли;  $1 \text{ а. е.} = 1,495\,98 \cdot 10^{11} \text{ м}$ .

Атмосфера техническая (ат, ат) — давление, производимое силой 1 кгс, равномерно распределенной по площади в  $1 \text{ см}^2$ ;  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,806\,65 \cdot 10^4 \text{ Па}$  (точно).

Атмосфера физическая (атм, atm) — нормальное атмосферное давление;  $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,033\,233 \text{ ат} = 1,013\,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Атомная единица массы\* (а. е. м., u) — масса, равная  $1/12$  массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ ;  $1 \text{ а. е. м.} = 1,660\,54 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Боровский радиус ( $a_1$ ) — радиус первой орбиты в модели водородного атома Бора;  $a_1 = 0,529\,177 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ .

БэВ — биллиэлектрон-вольт, старое обозначение гигаэлектрон-вольта;  $1 \text{ БэВ} = 10^9 \text{ эВ} = 1,602\,18 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$ .

Гамма ( $\gamma$ ) — единица напряженности магнитного поля;  $1 \gamma = 10^{-5} \text{ Э} = 7,957\,75 \cdot 10^{-4} \text{ А/м}$ . Второе значение — см. ниже в этом параграфе.

Дебай (Д, D) — единица электрического момента диполя;  $1 \text{ Д} = (1/3) \cdot 10^{-29} \text{ Кл} \cdot \text{м}$ .

Икс-единица (икс-ед., X) — единица длины, применяемая для выражения параметров кристаллических решеток и длин волн рентгеновского и гамма-излучения;  $1 \text{ икс-ед.} = 1,0021 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ .

Инерта (и, i) — единица массы в технической системе;  $1 \text{ и} = 9,806\,65 \text{ кг}$  (точно). Более употребительное название — техническая единица массы (т. е. м.), см. ниже.

Калория международная (кал, cal) — количество теплоты, необходимой для нагревания 1 г воды на  $1^\circ\text{C}$  при определенной исходной температуре;  $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$  (точно). На основе калории был образован ряд производных единиц тепловых величин.

Калория термохимическая (кал<sub>тх</sub>, cal<sub>тх</sub>) равна 4,1840 Дж.

Калория 15-градусная (кал<sub>15</sub>, cal<sub>15</sub>) равна 4,1855 Дж.

Карат (кар) — единица для выражения массы драгоценных камней и жемчуга;  $1 \text{ кар} = 0,2 \text{ г}$  (точно).

Килограмм-сила (кгс, kgf) — основная единица технической системы;  $1 \text{ кгс} = 9,806\,65 \text{ Н}$  (точно). В некоторых странах носит название килопонд (кп, kp).

Кюри (Ки, Ci) — активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  спонтанных переходов в секунду;  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$  (точно).

**Ламберт** (Лб, Lb) — единица яркости;  $1 \text{ Лб} = 10^4 \text{ асб} = 1/\pi \text{ лсб} = 3183 \text{ кд/м}^2$ .

**Лошадиная сила** (л. с., HP) — мощность, равная  $75 \text{ кгс} \cdot \text{м/с}$ ;  $1 \text{ л. с.} = 735,499 \text{ Вт}$ . Применялась также лошадиная сила Уатта, или английская паровая лошадь,  $\text{hp} = \text{HF} = 1,0139 \text{ л. с.} = 745,7 \text{ Вт}$ .

**Махе** (махе) — объемная активность (концентрация) радиоактивного источника, при которой  $1 \text{ л}$  воды (воздуха), содержащей источник, обладает активностью  $3,63 \cdot 10^{-10} \text{ Ки}$ ;  $1 \text{ махе} = 13,4 \times 10^3 \text{ Бк/м}^3$ .

**Миллиметр водяного столба** (мм вод. ст., mm H<sub>2</sub>O) — гидростатическое давление водяного столба высотой  $1 \text{ мм}$  на горизонтальное основание при  $g = g_n$ ;  $1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$  (точно).

**Миллиметр ртутного столба** (мм рт. ст., mm Hg) — гидростатическое давление ртутного столба высотой  $1 \text{ мм}$  на горизонтальное основание при  $g = g_n$ ;  $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$ .

**Миля морская** (миля, n mile) — единица длины, равная усредненному значению длины угловой минуты земного меридиана;  $1 \text{ морская миля} = 1852 \text{ м}$  (точно).

**Бед** (бед) — экспозиционная доза нейтронного излучения, равная дозе, при которой в  $1 \text{ кг}$  тканезквивалентного газа производятся ионы, несущие заряд в  $1$  франклин каждого знака;  $1 \text{ бед} = (1/3) \times 10^{-9} \text{ Кл/кг}$ . В качестве тканезквивалентного газа применяется смесь метана, углекислого газа и азота.

**Парсек\***, параллакс-секунда (пк, pc) — расстояние, на котором большая полуось земной орбиты видна под углом в одну угловую секунду;  $1 \text{ ПК} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$ . Расстояние до ближайшей звезды, Проксимы Центавра, равно  $1,31 \text{ ПК}$ .

**Рентген** (R, R) — экспозиционная доза, при которой вызванная рентгеновским или гамма-излучением корпускулярная эмиссия образует в каждом кубическом сантиметре воздуха ионы, несущие заряд в  $1$  франклин каждого знака;  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$  (точно).

**Румб** (румб) — плоский угол, равный  $1/32$  полного угла;  $1 \text{ румб} = 11,25^\circ = 0,19635 \text{ рад}$ .

**Световой год\*** (св. год, ly) — расстояние, которое свет проходит в вакууме за один тропический год;  $1 \text{ св. год} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м}$ .

**Сило-час** (с-ч) — работа, совершаемая двигателем мощностью  $1 \text{ л. с.}$  в течение часа;  $1 \text{ с-ч} = 2,648 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

**Термия** (тм, tm) — количество теплоты, необходимой для нагревания одной тонны воды на  $1^\circ \text{C}$  при определенной исходной температуре;  $1 \text{ тм} = 10^6 \text{ кал} = 4,1868 \cdot 10^9 \text{ Дж}$  (точно).

**Техническая единица массы** (т. е. м.) — единица массы в технической системе, другое название — инерта (см. выше);  $1 \text{ т. е. м.} = 9,80665 \text{ кг}$  (точно).

**Тонна-сила** (тс, tf) — вес тела массой в одну тонну в нормальных условиях;  $1 \text{ тс} = 10^3 \text{ кгс} = 9,80665 \cdot 10^3 \text{ Н}$  (точно).

**Торр** (Тор, Torr) — то же, что и миллиметр ртутного столба;  $1 \text{ Тор} = 133,322 \text{ Па}$ .

**Узел** (уз, kn) — скорость, равная одной морской миле в час;  $1 \text{ уз} = 0,514444 \text{ м/с}$ .

**Урановая единица** — единица  $\alpha$ -активности — активность оксида  $\text{U}_3\text{O}_8$  при плотности покрытия поверхности  $20 \text{ мг/см}^2$ . Урановая единица соответствует в воздухе ионизационному току с плотностью  $5,78 \cdot 10^{-13} \text{ А/см}^2$ , т. е. равна  $5,78 \cdot 10^{-13} \text{ А}/2e = 1,804 \cdot 10^6 \text{ Бк}$ .

**Фарадей** (F) — заряд одного моля электронов,  $1 \text{ F} = e \{N_A\} =$

$= 9,648\,531 \cdot 10^4$  Кл ( $e$  — элементарный заряд,  $N_A = 6,022\,137 \times 10^{23}$  моль $^{-1}$  — постоянная Авогадро).

**Фригория** (фрг, frg) — «отрицательная килокалория», единица количества теплоты, отводимой от системы; 1 фрг =  $-4,1868 \cdot 10^3$  Дж (точно).

**Эйнштейн** (Э, E) — единица количества электромагнитного поля, аналогичная единице количества вещества — молю. 1 Э вызывает фотохимическое превращение 1 моля вещества в системе, способной к фотохимическим реакциям; 1 Э =  $6,022\,137 \cdot 10^{23}$  фотонов. Иногда под эйнштейном понимают энергию этого количества фотонов, и тогда размер эйнштейна зависит от частоты, 1 Э =  $h\nu\{N_A\}$  ( $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота).

**Электрон-вольт\*** (эВ, eV) — энергия, приобретаемая частицей с зарядом, равным заряду электрона, при прохождении разности потенциалов в 1 В; 1 эВ =  $1,602\,177 \cdot 10^{-19}$  Дж.

**Эман** (Э, E) — объемная активность (концентрация) радиоактивного источника, при которой 1 л воды (воздуха), содержащей источник, обладает активностью  $10^{-10}$  Ки; 1 Э =  $10^{-10}$  Ки/л =  $3,7$  Бк/л =  $3700$  Бк/м $^3$  (точно).

Единицы с внесистемными названиями. Приводим список единиц, являющихся десятичным кратным или дольным от единиц Международной системы, но имеющих специальные наименования и размеры, не образованные посредством установленных приставок и множителей.

**Аком** (акустический ом) — единица акустического сопротивления в системе СГС; 1 аком =  $10^5$  Па·с/м $^3$ .

**Ангстрем** (Å, Å) — единица длины, 1 Å =  $10^{-10}$  м = 0,1 нм.

**Ар** (а, а) — единица площади; 1 а = 100 м $^2$ .

**Бар** (бар, bar) — единица давления; 1 бар =  $10^5$  Па. В прошлом бар — название единицы системы СГС, равной 1 дин/см $^2$  = 0,1 Па.

**Бария** — единица давления; 1 бария = 1 дин/см $^2$  = 0,1 Па.

**Барн** (б, b) — единица площади, применяемая для выражения эффективного сечения ядерных процессов; 1 б =  $10^{-28}$  м $^2$ .

**Био** (Био, Bio) — единица силы тока в системе СГСМ; 1 Био = 10 А.

**Бэр** (бэр, rem; rem) — единица эквивалентной дозы излучения — биологический эквивалент рентгена; 1 бэр = 0,01 Зв.

**Гал** (Гал, Gal) — единица ускорения в системе СГС; 1 Гал = 1 см/с $^2$  = 0,01 м/с $^2$ .

**Гамма** ( $\gamma$ ) — единица массы; 1  $\gamma$  =  $10^{-9}$  кг = микрограмм. Другое значение — см. выше.

**Гаусс** (Гс, Gs) — единица магнитной индукции в гауссовой системе; 1 Гс =  $10^{-4}$  Тл.

**Гектар\*** (га, ha) — единица площади; 1 га = 100 ар =  $10^4$  м $^2$ .

**Дина** (дин, dyn) — единица силы в системе СГС; 1 дин =  $10^{-5}$  Н.

**Диоптрия\*** (дптр) — единица оптической силы; 1 дптр = 1 м $^{-1}$ .

**Кейзер** (Кз, Ks) — единица волнового числа в системе СГС, 1 Кз = 1 см $^{-1}$  = 100 м $^{-1}$ .

**Ламбда** (лмб,  $\lambda$ ) — единица объема, 1 лмб = 1 мкл =  $10^{-9}$  м $^3$ .

**Литр\*** (л; l, L) — единица объема; 1 л = 1 дм $^3$  =  $10^{-3}$  м $^3$ .

**Максвелл** (Мкс, Mx) — единица магнитного потока в гауссовой системе; 1 Мкс =  $10^{-8}$  Вб.

**Микрон** (мк,  $\mu$ ) — единица длины; 1 мк =  $10^{-6}$  м. Согласно дей-

ствующему стандарту носит название микрометр, совпадающее с названием измерительного прибора.

Нит (нт, nt) — единица яркости;  $1 \text{ нт} = 1 \text{ кд/м}^2$ .

Оборот в секунду (об/с, r/s) — единица частоты вращения;  $1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Пуаз (П, P) — единица динамической вязкости в системе СГС;  $1 \text{ П} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^2 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Пьеза (пз, pz) — единица давления в системе МТС;  $1 \text{ пз} = 10^3 \text{ Па}$ .

Рад (рад; rad, rd) — единица поглощенной дозы излучения;  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .

Резерфорд (Рд, Rd) — единица активности нуклида в радиоактивном источнике;  $1 \text{ Рд} = 10^6 \text{ Бк}$ .

Стен, стэн (сн, sn) — единица силы в системе МТС;  $1 \text{ сн} = 10^3 \text{ Н}$ .

Стильб (сб, sb) — единица яркости в системе СГС;  $1 \text{ Сб} = 1 \text{ кд/см}^2 = 10^4 \text{ кд/м}^2$ .

Стокс (Ст, St) — единица кинематической вязкости в системе СГС;  $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Текс (текс, tex) — единица линейной плотности или толщины нити;  $1 \text{ текс} = 10^{-6} \text{ кг/м} = 1 \text{ мг/м}$ .

Тонна\* (т, t) — единица массы;  $1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$ .

Ферми (Фм, Fm) — единица длины;  $1 \text{ Фм} = 10^{-15} \text{ м} = 1 \text{ фемтометр} = 1 \text{ фм}$ .

Фот (фот, phot) — единица освещенности в системе СГС;  $1 \text{ фот} = 1 \text{ кд} \cdot \text{ср/см}^2 = 10^4 \text{ лк}$ .

Центнер (ц, q) — единица массы;  $1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}$ .

Эрг (эрг, erg) — единица энергии в системе СГС;  $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$ .

Этвеш (Э, E) — единица градиента ускорения (применяется в геофизике);  $1 \text{ Э} = 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ .

**Температурные шкалы.** Помимо температурных шкал Кельвина ( $T$ ) и Цельсия ( $t$ ), вошедших в Международную систему, были широко распространены также температурные шкалы Реомюра ( $T_R$ ), Фаренгейта ( $T_F$ ) и Рэнкина ( $T_{Ra}$ ). Приведение этих внесистемных температур к шкалам Кельвина и Цельсия производится по формулам

$$t = T - 273,15,$$

$$T_R = \frac{4}{5} T - 218,52 = \frac{4}{5} t;$$

$$T_F = \frac{9}{5} T - 459,67 = \frac{9}{5} t + 32;$$

$$T_{Ra} = \frac{9}{5} T = \frac{9}{5} t + 491,67.$$

Размеры единиц (градусов) названных температурных шкал по отношению к кельвину составляют

$$1^\circ \text{C} = 1 \text{ K}; \quad 1^\circ \text{R} = \frac{5}{4} \text{ K}; \quad 1^\circ \text{F} = \frac{5}{9} \text{ K}; \quad 1^\circ \text{Ra} = \frac{5}{9} \text{ K}.$$

Три характерные температуры по указанным шкалам:  
абсолютный нуль

$$0 \text{ K} = -273,15^\circ \text{C} = -218,52^\circ \text{R} = -459,67^\circ \text{F} = 0^\circ \text{Ra},$$

температура замерзания воды при нормальном давлении

$$273,15 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 0 \text{ }^\circ\text{R} = 32 \text{ }^\circ\text{F} = 491,67 \text{ }^\circ\text{Ra},$$

температура кипения воды при нормальном давлении

$$373,15 \text{ K} = 100 \text{ }^\circ\text{C} = 80 \text{ }^\circ\text{R} = 212 \text{ }^\circ\text{F} = 671,67 \text{ }^\circ\text{Ra}.$$

## Глава 6

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### 30. РАСПОЗНАВАНИЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

При пользовании научно-технической литературой в каждом случае необходимо знать, в какой системе единиц ведутся расчеты и пишутся уравнения. В отношении единиц механики и большинства других областей обычно не возникает проблем. Но распознавание систем электрических и магнитных единиц ввиду значительного их многообразия может представить некоторые трудности.

Задача эта напоминает определение иностранного языка по внешним особенностям его письменности. Так, применение латинского алфавита сразу ограничивает круг поиска европейскими языками. Затем используются более детальные признаки, такие как часто повторяющиеся сочетания букв, отсутствие ряда букв в алфавите, специальные значки при буквах (диакритические знаки) и т. п. Разумеется, определение языка облегчается, если он оказывается в той или иной мере знакомым.

Системы единиц распознаются по виду уравнений, по выражениям размерности физических величин, по названиям единиц. Ориентирующую роль играет и вероятность применения той или иной системы единиц.

В настоящее время используются в-сущности лишь две системы единиц — Международная система (СИ) и гауссова система. При этом в большинстве случаев можно ожидать применения Международной системы, которая принята в качестве обязательной. В радиоэлектронике, электротехнике, энергетике другие системы практически не применяются. В теоретической физике предпочитают гауссову систему.

В литературе прошлых десятилетий можно встретить и такие системы единиц электромагнетизма, как СГСЭ и СГС<sub>ε<sub>0</sub></sub>, СГСМ и СГС<sub>μ<sub>0</sub></sub>. В прошлом, хотя и редко, использовались также системы СГСФ, СГСБ и система Хевисайда — Лоренца.

Распознавание системы электрических и магнитных единиц по виду уравнений можно осуществить при помощи табл. П12—П14. В табл. П12 приведены уравнения электромагнетизма, вид которых одинаков во всех системах единиц. Большинство этих уравнений в сущности представляют определения соответствующих магнитных или электрических величин. В табл. П13 указаны значения абсолютной магнитной и диэлектрической проницаемости вакуума  $\mu_0$ ,  $\epsilon_0$  в различных системах единиц. Там же приведены значения так называемого коэффициента рационализации  $a$ , равного  $4\pi$  в нерационализированных и единице в рационализированных системах. Таблица П13 содержит также значения вспомогательного «коэффициента смешивания»

$$\gamma = c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0},$$

однозначно зависящего от произведения  $\mu_0 \epsilon_0$ . Коэффициент смешивания равен  $c$  в смешанных системах (гауссовой и Хевисайда — Лоренца) и единице во всех остальных, обладающих последовательностью систем. Наконец, в табл. П14 собраны уравнения электромагнетизма, имеющие различное написание в различных системах единиц. Приведен также общий вид каждого из уравнений, определяемый тремя параметрами —  $\mu_0, \epsilon_0, a$ .

Поскольку некоторые из систем единиц были в свое время построены в предположении существования магнитных масс, в табл. П12, П14 включены и уравнения, содержащие фиктивные магнитные массы  $m$ .

Сопоставляя встреченные уравнения с уравнениями табл. П12 и П14, в большинстве случаев удастся определить, в какой системе единиц они написаны. Однако табл. П14 довольно обширна. Ориентированию в системах единиц электромагнетизма может способствовать их классификация, представленная в следующей таблице.

Классификация систем единиц

Системы единиц	$\gamma=c$	$\gamma=1$		
	Симметричные (смешанные) $\mu_0=\epsilon_0=1$	Электромагнитные $\mu_0=1$ $\epsilon_0=\frac{1}{c^2}$	Электростатические $\mu_0=\frac{1}{c^2}$ $\epsilon_0=1$	Сбалансированные $\frac{1}{ c ^2} < \{\mu_0\} < 1$ $\epsilon_0=1/(c^2\mu_0)$
Нерационализованные $a=4\pi$	Гауссова система СГС (Г)	СГСМ СГС $\mu_0$ СГСБ		СГСЭ СГС $\epsilon_0$ СГСФ
Рационализованные $a=1$	Система Хевисайда—Лоренца	—	—	Международная система СИ (МКСА)

Пусть по виду встретившихся уравнений установлено, рационализованы они или нет ( $a=1, a=4\pi$ ) и является ли система единиц смешанной или нет ( $\gamma=c, \gamma=1$ ). Тогда приведенная таблица однозначно укажет одну из трех систем единиц (гауссову, Хевисайда — Лоренца, СИ) или шесть систем, обведенных в таблице общей рамкой.

Признак рационализованной системы — наличие коэффициентов  $4\pi$  или  $2\pi$  в уравнениях, относящихся к полям со сферической или цилиндрической симметрией, и отсутствие этих коэффициентов в отсутствие указанной симметрии. Примерами могут служить закон Кулона и формула емкости плоского конденсатора

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}; \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (51)$$

В нерационализованных системах, напротив, эти коэффициенты рас-



ставлены вопреки логике:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_0 \epsilon r^2}; \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{4\pi d}. \quad (52)$$

Признаком смешанной системы являются коэффициенты  $c$  или  $c^2$  в уравнениях, связывающих электрические и магнитные величины, например

$$H = \frac{I}{cl}; \quad \mathcal{E} = -\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt}; \quad F = qE + \frac{q}{c} [vB].$$

При этом часто встречаются сочетания  $I/c$  и  $q/c$ , а электрическое смещение  $D$  и магнитная индукция  $B$  нередко заменены на  $\vec{E}$ ,  $H$ .

В уравнениях же последовательно построенных систем, обведенных в таблице общей рамкой, коэффициенты  $c$  не встречаются, а коэффициенты  $c^2$  могут стоять и в уравнениях, содержащих одни только электрические или одни только магнитные величины. Появляются эти коэффициенты в результате подстановки  $\epsilon_0 = 1/c^2$  (электромагнитные системы) или  $\mu_0 = 1/c^2$  (электростатические системы). По этому признаку можно определить, относится ли данная система к одной из электромагнитных или к одной из электростатических систем.

Привлекая соображения размерности, по некоторым уравнениям можно установить принадлежность их к какой-либо из систем СГС. В этих системах одна из постоянных  $\mu_0$ ,  $\epsilon_0$ , а в гауссовой системе и обе они приняты равными единице. В тех уравнениях, в которые должны входить эти постоянные, они заменены безразмерными единицами, а проще говоря, выброшены. Это приводит к нарушениям размерности. Если подстановка размерности всех величин, которую они имеют в Международной системе, обнаруживает нарушение размерности в данном уравнении, оно относится к одной из систем СГС.

О применяемой системе единиц почти с полной определенностью говорят названия основных единиц, а также выражения размерности и даже одни только символы размерности, как видно из следующей таблицы.

Целочисленность или дробность показателей и частота совпадений размерности, указанные в двух последних столбцах, также являются характерными признаками систем единиц.

#### Отличительные признаки систем единиц

Основные единицы	Символы размерности	Система единиц	Показатели размерности	Совпадения размерности разнородных величин
м, кг, с, А	<i>LMTI</i>	СИ (МКСА)	Целочисленные	Очень редкие
см, г, с, Био	<i>LMTI</i>	СГСБ	То же	То же
см, г, с, Фр	<i>LMTQ</i>	СГСФ	»	»
см, г, с, $\mu_0$	<i>LMT\mu</i>	СГС $\mu_0$	Дробные	»
см, г, с, $\epsilon_0$	<i>LMT\epsilon</i>	СГС $\epsilon_0$	»	»
см, г, с	<i>LMT</i>	СГСМ, СГСЭ	»	Частые
см, г, с	<i>LMT</i>	Гауссова, Хевисайда— Лоренца	»	Очень частые

Дополнительную, а иногда и определяющую информацию дают названия производных единиц системы. Кулон, вольт, ом, сиemens, фарад, вебер, тесла, генри, ампер на метр и другие практические единицы относятся к Международной системе (и МКСА). Эрстед, гаусс, максвелл, гильберт — единицы гауссовой системы и систем СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ. Био — единица силы электрического тока в трех последних системах. Франклин — единица электрического заряда в системах СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ и в гауссовой системе. Ввиду отсутствия специальных наименований у большинства единиц СГС их нередко именуют описательно, например

ед. СГС, ед. СГСМ, ед. СГСЭ,

что непосредственно указывает используемую систему единиц.

Распознавание какой-либо одной из трех электромагнитных систем или одной из трех электростатических систем ввиду одинаковости уравнений и размеров единиц в пределах каждой тройки систем возможно лишь по выражениям размерности.

Естественные системы единиц имеют сравнительно ограниченное применение, и обычно использование их в каждом случае специально оговаривается.

### 31. ЕДИНСТВО СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Системы электрических и магнитных единиц, как можно было видеть, весьма многочисленны и разнообразны. Они отличаются одна от другой числом и выбором основных единиц, размерами единиц, написанием уравнений, рационализацией или ее отсутствием, выражениями размерности и, в частности, дробностью или целочисленностью показателей размерности.

В литературе обычно не задаются вопросом о причинах такого многообразия. Дробность показателей размерности связывают с законом Кулона и выбором трех, а не четырех основных единиц. В самом деле, квадрат электрического заряда выражается из закона Кулона через *первые степени* длины и массы. Системы СГС $\mu_0$  и СГС $\epsilon_0$  с их четвертой основной единицей рассматривают лишь как незначительную и необязательную модификацию систем СГСМ и СГСЭ, в сущности не дающую ничего нового. О системах СГСБ и СГСФ если и упоминают, то как о давних нововведениях, не привившихся на практике.

Таковы стереотипные представления, сложившиеся в литературе прошлых десятилетий.

В действительности, однако, роль четвертой основной единицы в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  весьма существенна.

Четвертый символ в выражениях размерности ( $\epsilon$  или  $\mu$ ), как можно видеть из табл. П16 и П17, устраняет совпадения размерности разнородных физических величин, остававшиеся необъяснимыми в системах СГСЭ и СГСМ. В системе СГС $\mu_0$  электрическое сопротивление уже не имеет размерности скорости, а индуктивность — размерности длины, как в системе СГСМ; магнитная индукция и напряженность магнитного поля уже не обладают одинаковой размерностью. Далее, в системе СГС $\epsilon_0$  емкость не имеет размерности длины, а напряженность электрического поля — размерности смещения, как в системе СГСЭ, и т. д.

Однако роль четвертой основной единицы этим не ограничивается. Каждая из величин имеет неодинаковую размерность в системах СГСМ и СГСЭ. В системах же СГС $\mu_0$  и СГС $\epsilon_0$  благодаря нали-

чию четвертого символа размерности ( $\mu$  или  $\epsilon$ ) размерность каждой данной величины в принципе может оказаться одной и той же. Реализуется ли в действительности эта возможность, т. е. не одинаковы ли размерности одних и тех же величин в системах СГС $\mu_0$  и СГС $\epsilon_0$ ?

Чтобы выяснить это, необходимо осуществить перевод размерностей из одной системы в другую. Процедура перевода размерностей при изменении выбора основных единиц известна довольно давно.

В книге Л. А. Сена [16] на с. 75 говорится: «Для перевода размерности какой-либо величины из одной системы в другую следует заменить размерность соответствующей основной единицы ее размерностью, выраженной в другой системе». Однако до настоящего времени указанный перевод размерностей применялся главным образом лишь к системам единиц механики.

Для перевода размерности физической величины из системы СГС $\epsilon_0$  в систему СГС $\mu_0$  следует подставить размерность  $\epsilon_0$ , выраженную в системе СГС $\mu_0$ :

$$\epsilon = \dim \epsilon_0 = L^{-2} T^2 \mu^{-1}.$$

Заметим, что это выражение  $\epsilon$  через  $\mu$  можно получить, даже не обращаясь к системе СГС $\mu_0$ , из выражения  $\mu$  через  $\epsilon$  в системе СГС $\epsilon_0$ :

$$\dim \mu_0 = \mu = L^{-2} T^2 \epsilon^{-1}.$$

Переведем, например, из одной системы в другую размерность магнитной индукции. В системе СГС $\epsilon_0$  она имеет вид

$$\dim B = L^{-3/2} M^{1/2} \epsilon^{-1/2}.$$

Подставив сюда выражение  $\epsilon$  через  $\mu$ , получим

$$\dim B = L^{-3/2} M^{1/2} (L^{-2} T^2 \mu^{-1})^{-1/2} = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{1/2}.$$

Но найденная таким путем размерность магнитной индукции полностью совпадает с ее размерностью в системе СГС $\mu_0$ , см. табл. П17.

Аналогичным образом можно перевести размерность из системы СГС $\epsilon_0$  в систему СГС $\mu_0$  и для других электрических и магнитных величин. Сверяя результаты с табл. П16 и П17, убедимся, что размерность любой из величин электромагнетизма в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$  одинакова. Разница лишь в том, что в первой из этих систем размерность выражена через  $\epsilon$ , а во второй — через  $\mu$ .

Перейдем к системам СГСФ и СГСБ. Произведем перевод размерности из первой системы во вторую путем подстановки

$$Q = \dim q = TI$$

в выражения размерности, стоящие в предпоследних столбцах табл. П16 и П17. Полученные таким путем результаты для всех величин совпадают с размерностью, указанной в последних столбцах этих таблиц. Другими словами, размерность любой величины в системах СГСФ и СГСБ одинакова, с той лишь разницей, что в одной системе она выражена через размерность заряда, а в другой — через размерность силы тока.

Наконец, оказывается, что одинаковы не только размерности электрических и магнитных величин в системах СГС $\epsilon_0$ , СГС $\mu_0$  и СГСФ, СГСБ, взятых парами, но и во всех четырех системах. В самом деле, размерность силы электрического тока в системе СГС $\epsilon_0$  есть

$$I = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2},$$

$$\varepsilon = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2.$$

Подставив это  $\varepsilon$  в выражения размерности системы СГС $\varepsilon_0$  (см. табл. П16 и П17), получим в точности те же размерности, которые свойственны величинам в системе СГСБ. Например, потенциал и напряжение в системе СГС $\varepsilon_0$  имеют размерность

$$\dim \varphi = \dim U = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \varepsilon^{-1/2},$$

подстановка же  $\varepsilon = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$  дает

$$\dim \varphi = \dim U = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} (L^{-3} M^{-1} T^4 I^2)^{-1/2} = L^2 M T^{-3} I^{-1},$$

т. е. как раз размерность потенциала и напряжения в системе СГСБ. Характерно, что дробные показатели размерности при этом переводе переходят в целочисленные.

Напомним, что основные величины в системе СГСБ те же, что и в МКСА и Международной системе единиц, и размерности каждой из величин в этих системах одинаковы.

Итак, размерность любой из электрических и магнитных величин в четырех системах СГС $\varepsilon_0$ , СГС $\mu_0$ , СГСФ, СГСБ одинакова и совпадает с их размерностью в МКСА и Международной системе. Различие же написаний размерности в этих системах, включая и дробность показателей в некоторых из них, обусловлено различием в них основных величин и их единиц ( $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$ , франклин, био, ампер).

Вернемся к системам СГСЭ и СГСМ. Все производные единицы СГСЭ совпадают с соответствующими единицами систем СГС $\varepsilon_0$  и СГСФ, а производные единицы СГСМ такие же, как и в системах СГС $\mu_0$ , СГСБ. Уравнения во всех шести системах одни и те же. Системы СГСЭ и СГСМ отличаются от остальных четырех лишь формальным отсутствием четвертой основной единицы, причем размерность величин в СГСЭ может быть получена из размерности в СГС $\varepsilon_0$  просто отбрасыванием символа  $\varepsilon$ , а размерность в СГСМ — отбрасыванием символа  $\mu$  из размерности в СГС $\mu_0$ .

Именно из-за отсутствия символов  $\varepsilon$  и  $\mu$  в системах СГСЭ и СГСМ размерность каждой из величин выглядит различной, и вместе с тем имеют место частые совпадения размерности разнородных физических величин.

Но символы  $\varepsilon$  и  $\mu$  отсутствуют в системах СГСЭ и СГСМ только потому, что постоянные  $\varepsilon_0$  и соответственно  $\mu_0$ , принятые в этих системах за единицы, были необоснованно посчитаны за отвлеченные (безразмерные) единицы. Разве допустимо было бы, скажем, выбросить символ  $I$  из выражений размерности величин в Международной системе только на том основании, что единица силы тока равна 1 А? Такая ампутация была бы явно незаконной.

Сказанное выше приводит к заключению, что системы СГСЭ и СГСМ принадлежит к тому же внутренне единому семейству систем, что и СГС $\varepsilon_0$ , СГС $\mu_0$ , СГСФ, СГСБ. Отсутствие символов  $\varepsilon$  и  $\mu$  в выражениях размерности, придающее системам СГСЭ и СГСМ «усеченный» вид, приходится признать исторически возникшим недоразумением. Фактически система СГСЭ совпадает с СГС $\varepsilon_0$ , а система СГСМ — с СГС $\mu_0$ ; в системах СГСЭ и СГСМ скрыто (неявно) есть и четвертые основные единицы —  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ .

Таким образом, системы единиц электромагнетизма обладают единством, которое выражается в том, что размерность любой из

электрических и магнитных величин фактически одинакова во всех системах. Это сохранение (инвариантность) размерности, однако, маскируется различием ее формальных выражений, обусловленным разным выбором основных единиц, а в некоторых системах — и некорректностью их построения.

Характерно, что вывод о единстве систем электрических и магнитных единиц коренным образом расходится с теми представлениями, которые постепенно складывались в ходе исторического развития систем единиц. Системы СГСЭ и СГСМ появились раньше систем СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$ , и последние рассматривались как несущественное видоизменение первых, а введение четвертой основной единицы — лишь как дань довольно сомнительным новым веяниям. Даже целочисленность показателей размерности в системах СГСФ, СГСБ и совпадение размерности величины в системах СГСБ и МКСА (а следовательно, и СИ) оставались как бы незамеченными. В то же время соединение единиц двух разных систем в гауссовой системе не вызывало возражений и представлялось вполне естественным.

Кстати, в гауссовой системе совпадения размерности разнородных физических величин особенно часты. К совпадениям, унаследованным от «усеченных» систем СГСЭ и СГСМ, добавляются совпадения, обусловленные смешением единиц двух этих систем с усеченными размерностями. Например, как видно из табл. П16 и П17, в гауссовой системе совпадает размерность трех величин — электрической емкости, индуктивности и длины и четырех других величин — электрического смещения, магнитной индукции, напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля.

Хотя системы СГС $\epsilon_0$ , СГС $\mu_0$ , СГСФ, СГСБ основаны на четырех единицах, однако в их уравнениях постоянные  $\epsilon_0$  или  $\mu_0$  заменены безразмерными единицами. Следовательно, уравнения этих четырех систем, как и систем СГСЭ, СГСМ, вообще говоря, являются лишь числовыми, но не физическими уравнениями и не предназначены для нахождения или проверки размерности величин.

В заключение целесообразно выяснить, почему в некоторых системах единиц показатели размерности оказываются дробными.

Причина проста. Представим себе, что вместо длины за основную величину принят объем  $V$ . Размерность объема будем обозначать тем же символом  $V$ . Поскольку объемы пропорциональны кубам линейных размеров,

$$\dim V = V = L^3,$$

и размерность длины выразится в виде

$$L = V^{1/3}.$$

Поэтому размерности скорости, ускорения, силы и других величин оказываются с дробными показателями:

$$\dim v = LT^{-1} = V^{1/3} T^{-1}; \quad \dim a = V^{1/3} T^{-2}; \quad \dim W = V^{2/3} MT^{-2}.$$

Аналогично, если принять за основную величину площадь, имеющую размерность  $\dim S = S = L^2$ , то размерность длины будет

$$L = S^{1/2},$$

а размерности скорости, ускорения, силы выразятся в виде

$$\dim v = S^{1/2} T^{-1}; \quad \dim a = S^{1/2} T^{-2}; \quad \dim F = S^{1/2} MT^{-2}.$$

Таково происхождение дробных показателей размерности. Их появление не связано ни с ограничением числа основных единиц тремя, ни с законом Кулона. Оказывается, различные физические величины в роли основных величин системы единиц неравноценны.

Показатели размерности получаются целочисленными, если в качестве основных выбраны такие величины, как длина, масса, сила, время, электрический заряд, сила электрического тока. Назовем их величинами первого порядка. Тогда площадь логично назвать величиной второго порядка, объем — величиной третьего порядка. Если в качестве основных выбираются величины второго и более высоких порядков, показатели размерности получаются дробными.

Пусть вместо силы электрического тока  $I$  — величины первого порядка — за основную величину выбирается какая-либо другая величина  $Y$  с размерностью в прежней системе  $\dim Y = L^p M^q T^r I^s$ . Выразим отсюда размерность силы тока  $I = L^{-p/s} M^{-q/s} T^{-r/s} Y^{1/s}$  и подставим ее в выражения размерности других величин в прежней системе:

$$\dim Z = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta = L^{\alpha - p\delta/s} M^{\beta - q\delta/s} T^{\gamma - r\delta/s} Y^{\delta/s}.$$

Поскольку в прежней системе показатели размерности ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ , и в частности  $p, q, r, s$ ) целочисленны, в новой системе показатели будут целочисленными, вообще говоря, лишь в случае  $s=1$  или  $s=-1$ . В противном случае, при  $|s| \geq 2$ , величина  $Y$  будет второго или более высокого порядка, и показатели размерности окажутся дробными.

Как видно из последнего столбца табл. П16 и П17, к величинам первого порядка помимо силы тока относятся электрический заряд, потенциал и напряженне, напряженности электрического и магнитного полей, смещение, магнитная индукция, магнитодвижущая сила, электрический и магнитный моменты. Но такие величины, как диэлектрическая и магнитная проницаемости, сопротивление, емкость, индуктивность, являются величинами второго порядка. Для них  $|s|=2$ . Замена силы тока в качестве основной величины на любую из этих величин второго порядка приведет к дробным показателям размерности.

Итак, дробность показателей размерности в системах СГС $\epsilon_0$  и СГС $\mu_0$ , а тем самым и в системах СГСЭ, СГСМ и гауссовой обусловлена неудачным выбором  $\epsilon_0$  или  $\mu_0$  в качестве основной единицы.

В свое время при обсуждении вопроса о четвертой основной единице для системы Джорджи на равных правах назывались ампер, кулон, ом и  $\mu_0$  (магн), см. § 26. Теперь можно видеть, что эти единицы в качестве основных отнюдь не равноценны. В отличие от ампера и кулона — величин первого порядка — ом и магн принадлежат к величинам второго порядка. Выбор ома как основной единицы привел бы к дробным показателям размерности. Точно так же дробными являются показатели размерности в системе МКСМ, одной из основных единиц которой является магн.

## 32. АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Значение размерностей не исчерпывается контролем правильности физических уравнений, переводом единиц из одной системы в другую и доказательством единства систем электромагнетизма (§ 31). Важную роль играют метод установления связей между физичес-

кими величинами, известный под названием анализа размерностей, и теория физического подобия.

Различные применения понятия размерности, от простых до сравнительно сложных, основаны на двух очевидных положениях:

1. В сумме физических величин все слагаемые имеют одну и ту же размерность; в частности, левая и правая части физического уравнения по размерности одинаковы.

2. Комбинации физических величин, являющиеся аргументами математических функций, безразмерны.

Как видно из этих положений, рассмотрение размерностей может давать лишь результаты, обладающие точностью до постоянного безразмерного множителя.

Остановимся сначала на использовании размерностей при создании системы единиц Джорджи (МКСА). Ом, вольт, ампер и другие практические единицы, первоначально установленные как десятичные кратные от единиц системы СГСМ, образовывали своеобразную систему единиц. Одной из ее основных единиц была секунда, а двумя другими были

$$\text{ом} = 10^9 \text{ ед. СГСМ}, \quad \text{вольт} = 10^8 \text{ ед. СГСМ}.$$

В число практических единиц входила и единица энергии

$$\text{джоуль} = \frac{\text{вольт в квадрате} \cdot \text{секунда}}{\text{ом}} = 10^7 \text{ ед. СГСМ} = 10^7 \text{ эрг}.$$

Ввиду широкого распространения практических единиц было целесообразно построить систему, объединяющую их с единицами механики. Для этого надо было подобрать такие основные единицы длины и массы, которые вместе с секундой привели бы к единице энергии, равной джоулю. Искомые единицы длины и массы как десятичные кратные единиц СГСМ должны иметь вид  $10^a$  см и  $10^b$  г. Поскольку энергия имеет размерность

$$\dim W = L^2 MT^{-2},$$

единица энергии должна быть равна

$$10^{2a+b} \text{ ед. СГСМ}.$$

Вместе с тем эта единица должна равняться джоулю, т. е.  $10^7$  ед. СГСМ. Это привело к уравнению

$$2a + b = 7,$$

которое надо было решить в достаточно удобных целых числах.

Два возможных решения были предложены Блонделем и Максвеллом:

$$a = 0, \quad b = 7, \quad [L] = 1 \text{ см}, \quad [m] = 10^7 \text{ г};$$

$$a = 9, \quad b = -11, \quad [L] = 10^9 \text{ см}, \quad [m] = 10^{-11} \text{ г}.$$

В системе Максвелла магнитная проницаемость вакуума получалась численно равной единице:

$$\mu_0 = 1 \text{ Гн}/(10^9 \text{ см}) = 10^{-9} \text{ Гн}/\text{см} = 1 \text{ ед. СГСМ}.$$

Эти системы из-за размера их единиц были мало удобными.

Решение, предложенное Джорджи в 1901 г., имело вид

$$a = 2, \quad b = 3, \quad [l] = 10^2 \text{ см} = 1 \text{ м}, \quad [m] = 10^3 \text{ г} = 1 \text{ кг},$$

и было, разумеется, наиболее удобным. Система Джорджи получила всеобщее признание и известность под названием системы МКС. Добавление четвертой основной единицы — ампера — превратило ее в систему МКСА, влившуюся впоследствии как составная часть в Международную систему единиц. Расчеты, приведшие к созданию системы МКСА, по своему характеру близки к выкладкам при анализе размерностей.

Анализ размерностей позволяет устанавливать связь между физическими величинами (физическое уравнение) во многих случаях, когда строгое решение задачи из-за большого числа параметров и математической сложности наталкивается на непреодолимые трудности.

Для применения этого метода необходимо вначале выделить физические величины, существенные в изучаемом явлении, включая и постоянные, обладающие размерностью. Затем искомую связь представляют в виде уравнения, которое обычно выражает одну из величин как произведение других величин, возведенных в некоторые неизвестные степени. Каждую из величин заменяют выражением ее размерности с соответствующими (известными) показателями. Наконец, исходя из равенства размерностей в левой и правой частях уравнения, получают систему уравнений для неизвестных показателей степени в искомом уравнении.

Иллюстрируем анализ размерностей на примере нахождения формулы, выражающей период колебаний математического маятника. Этот маятник представляет собой точечный груз с массой  $m$ , укрепленный на нижнем конце жесткого и невесомого стержня длиной  $l$ , верхний конец которого подвешен в неподвижном шарнире. Трением и сопротивлением воздуха пренебрегают.

Помимо длины стержня  $l$  и массы  $m$ , очевидно, существенное значение может иметь и ускорение силы тяжести  $g$ . Период колебаний маятника, как можно предположить, выражается равенством вида

$$T = C g^x l^y m^z,$$

где  $C$  — безразмерная постоянная;  $x$ ,  $y$  и  $z$  — неизвестные показатели степени. Подставляем вместо физических величин  $T$ ,  $g$ ,  $l$  и  $m$  выражения их размерностей:

$$T = (LT^{-2})^x L^y M^z.$$

Поскольку размерности в обеих частях уравнения должны быть одинаковы, получаем систему уравнений

$$x + y = 0; \quad z = 0; \quad -2x = 1,$$

из которой находим

$$x = -1/2, \quad y = 1/2, \quad z = 0.$$

Таким образом, искомая формула для периода колебаний маятника имеет вид

$$T = C \sqrt{l/g}.$$

В данном случае метод оказался достаточно сильным, чтобы устано-



вить вопреки первоначальному предположению независимость периода колебаний маятника от массы груза  $m$ . Но значение постоянной  $C$ , как уже отмечалось, анализ размерностей указать не в состоянии. Полное физическое рассмотрение задачи дает  $C=2\pi$ .

Целесообразно добавить, что найденная формула справедлива лишь приближенно, и тем точнее, чем меньше размах колебаний маятника. Но установить это, и тем более вычислить период при больших колебаниях, — вне возможностей использованного метода.

Анализ размерностей, как показывает приведенный пример, не является универсальным и всемогущим методом. Он позволяет найти искомую связь между физическими величинами лишь с точностью до постоянного безразмерного коэффициента. Для анализа размерностей в каждом случае необходимо предварительно знать, какие физические величины и размерные постоянные существенны для рассматриваемого явления. Нередко приходится интуитивно делать те или иные дополнительные предположения, которые могут оказаться не вполне верными или даже ошибочными.

И тем не менее анализ размерностей доказал свою плодотворность в ряде областей физики, таких как аэродинамика, гидравлика, теплотехника и др., где строгое и точное исследование затруднительно.

Дальнейшее развитие соображений размерности привело к теории физического подобия. Была доказана так называемая  $\pi$ -теорема, гласящая, что всякое соотношение между  $n$  физическими величинами можно представить в виде соотношения между  $n-k$  безразмерными комбинациями, составленными из этих величин, где  $k$  — число основных единиц в системе. Если все соответствующие безразмерные характеристики, называемые критериями подобия, для двух явлений одинаковы, то эти явления физически подобны.

Использование теории подобия оказалось особенно целесообразным при решении сложных задач, когда для полного описания явления нет достаточных данных или оно чрезвычайно затруднено. Так, исследование движения реальной (вязкой) жидкости привело к важным результатам, когда Рейнольдс ввел критерий, носящий его имя. Число Рейнольдса равно

$$Re = \rho v D / \eta,$$

где  $v$  — скорость течения жидкости;  $\rho$  и  $\eta$  — ее плотность и динамическая вязкость;  $D$  — диаметр трубы. Опыты показали, что при превышении так называемого критического числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 2300$  упорядоченное (ламинарное) течение жидкости может уступить место беспорядочному (турбулентному) течению.

Хорошо известен такой критерий подобия, как число Маха

$$M = v/a.$$

При движении тела в газе число Маха равно отношению скорости тела  $v$  к скорости звука в газовой среде  $a$ . При  $M \ll 1$  газы можно считать несжимаемыми. В воздухе сжимаемость необходимо учитывать при скоростях  $v > 100$  м/с ( $M > 0,3$ ). При  $M < 1$  движение называют дозвуковым, при  $M = 1$  — звуковым, при  $M > 1$  — сверхзвуковым, при  $M > 5$  — гиперзвуковым. Каждый из этих случаев имеет свои особенности.

Метод подобия позволяет изучать многие явления на их уменьшенных моделях, что существенно расширяет возможности экспериментального исследования.

Кстати, и в случаях, когда функциональная зависимость между физическими величинами известна и выражена соответствующим уравнением, бывает целесообразно представить ее в виде зависимости между комбинациями величин, из которых хотя бы некоторые комбинации безразмерны. Это облегчает анализ и обобщение имеющейся зависимости.

### 33. О ЧИСЛЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ И СМЫСЛЕ РАЗМЕРНОСТИ

В литературе по системам единиц распространено представление, согласно которому система может быть построена на любом числе основных единиц, и его выбор диктуется лишь соображениями практического удобства. Утверждают, что число основных единиц можно уменьшить, приняв за единицу какую-либо из фундаментальных констант, входящих в физические уравнения, например гравитационную постоянную. Поэтому в принципе возможны системы, имеющие только две, одну и даже не имеющие ни одной основной единицы. Введение же новых размерных констант, как утверждают, привело бы к увеличению числа основных единиц. А при выбранном их числе конкретный выбор основных единиц (например, ампера или ома) есть также лишь вопрос удобства.

В литературе утверждается, кроме того, что размерность отнюдь не следует рассматривать как некое неизменное свойство, присущее данной физической величине. В подтверждение приводят слова М. Планка: «... ясно, что размерность какой-либо физической величины не есть свойство, связанное с существом ее, но представляет просто некоторую условность, определяемую выбором системы измерений» [14]. Планк писал также: «...то обстоятельство, что какая-либо физическая величина имеет в двух различных системах единиц не только разные числовые значения, но даже и различные размерности, часто истолковывалось как некоторое логическое противоречие, требующее себе объяснения, и между прочим, подало повод к постановке вопроса об «истинной» размерности физических величин... нет никакой особой необходимости доказывать, что подобный вопрос имеет не более смысла, чем вопрос об «истинном» названии какого-либо предмета» [15].

Описанные взгляды на число и выбор основных единиц и на смысл размерности, несомненно, подкреплялись существованием множества различных систем единиц электромагнетизма. В одних из этих систем было три, а в других — четыре основные единицы. В одних системах основной единицей была абсолютная магнитная проницаемость вакуума, в других — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, в третьих — единица силы электрического тока и т. д. Явно различные физические величины в некоторых из систем имели одну и ту же размерность, и наоборот, размерность одних и тех же величин в разных системах оказывалась различной.

Однако подтверждение приведенных взглядов, которое усматривали в существовавших системах единиц, было лишь кажущимся. Анализ строения всех известных систем единиц электромагнетизма выявил их внутреннее единство. Число основных единиц в них фактически одинаково и равно четырем, а размерности физических величин при приведении к одним и тем же основным величинам совпадают (см. § 31). Внутреннее единство присуще и системам единиц

в других областях явлений. Так, во всех системах механики имеются три основные единицы.

Встречающиеся в литературе утверждения о возможности изменить число основных единиц не отличаются ясностью. Они никогда не были подтверждены на практике, скажем, созданием системы механических единиц с двумя или четырьмя основными единицами. А принятие магнитной или диэлектрической проницаемости вакуума за единицу в системах СГСМ, СГСЭ не привело к ограничению числа основных единиц тремя. Фактически их четыре в этих системах, признание чего и выразилось в появлении систем СГС $\mu_0$ , СГС $\epsilon_0$ .

Размерность, будучи качественной характеристикой физической величины, несомненно не является полной и исчерпывающей, а лишь условной ее характеристикой. Эта условность явно ощутима в гауссовой системе, где размерности электрических величин взяты из системы СГСЭ, а магнитных — из СГСМ. Но в Международной системе условный характер размерности практически не ощущается. Для единиц электромагнетизма и других областей достигнута такая же четкость и простота, как и в механике. Пользование единицами СИ приводит к убеждению в том, что каждой физической величине присуща своя собственная неизменная размерность. Недаром такое убеждение, вопреки мнению Планка, довольно упорно отстаивалось в прошлом в литературе. Воспитано оно было на системах единиц механики, отличавшихся с самого начала ясностью, последовательностью и стройностью. И действительно, довольно трудно сомневаться в том, например, что скорости присуща размерность длины, разделенной на время.

#### 34. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ

Цели рационализации уравнений электромагнетизма, предложенной Хевисайдом, были охарактеризованы в гл. 2, § 7. Эти цели можно иллюстрировать выражениями для потенциала точечного заряда до и после рационализации

$$\varphi = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon r} ; \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r}$$

Последнее выражение с коэффициентом  $4\pi$  в знаменателе ввиду сферической симметрии поля более логично.

Рационализованной системе Хевисайда—Лоренца был посвящен § 25. Рационализация системы МКСА, приведшая к уравнениям Международной системы единиц, произведена во многом иначе.

В § 30 уже приводились закон Кулона и формула емкости плоского конденсатора в нерационализованном виде (52) и после рационализации (51). Введение коэффициента  $4\pi$  в закон Кулона

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$$

должно быть как-то скомпенсировано изменением числовых значений входящих в него физических величин. Поскольку механические величины  $F$  и  $r$ , а также  $\epsilon$  не подлежат изменению, оно может кос-

нуться лишь заряда  $q$  или диэлектрической проницаемости вакуума  $\epsilon_0$ .

Достичь изменения числовых значений физической величины можно или изменением единицы этой величины, или изменением самого понятия величины, т. е. заменой ее на другую, однородную, но не равную ей. В первом случае говорят о рационализации единицы, во втором — о рационализации самой величины. Примером изменения понятия физической величины может служить переход от частоты  $\nu$  к угловой частоте  $\omega = 2\pi\nu$  или переход от постоянной Планка  $h$  к постоянной  $\hbar = h/2\pi$ .

При построении системы Хевисайда — Лоренца, в которой принято  $\epsilon_0 = 1$ , пришлось увеличить в  $\sqrt{4\pi}$  раз числовые значения заряда, уменьшив во столько же раз его единицу. В случае рационализации системы МКСА имелась некоторая свобода выбора. В международных организациях было достигнуто соглашение о том, что при рационализации не следует изменять понятия и размер единиц важнейших величин, в том числе и электрического заряда. Поэтому осталась лишь одна возможность — уменьшить в  $4\pi$  раз числовое значение абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума  $\epsilon_0$ . Соответственно числовое значение абсолютной магнитной проницаемости вакуума

$$\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2)$$

увеличилось в  $4\pi$  раз.

В нерационализованной системе МКСА  $\mu_0 = 10^{-7}$  Гн/м. Единицы индуктивности и емкости — генри и фарад — при рационализации не могут измениться. Поэтому рационализируются сами понятия  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$ . В рационализованной системе МКСА и Международной системе абсолютная магнитная и абсолютная диэлектрическая проницаемости вакуума, называемые магнитной и электрической постоянными, равны

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м (точно);}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ Ф/м.}$$

В табл. П12 приведены уравнения электромагнетизма, написание которых одинаково во всех системах и, в частности, не изменяется при рационализации. Добавим к ним уравнения

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}\mathbf{B}]; \quad L = \Psi/I,$$

также не изменяющиеся при рационализации. Согласно указанным уравнениям ввиду неизменности электрического заряда и механических величин при рационализации сохраняются неизменными наиболее важные электрические и магнитные величины — сила тока, напряженность электрического поля, потенциал, напряжение и ЭДС, электрическая емкость, сопротивление, проводимость, магнитная индукция, магнитный поток, потокосцепление, индуктивность. Остаются без изменения и единицы этих величин — кулон, ампер, вольт, вольт на метр, фарад, ом, сименс, тесла, вебер, генри.

Однако некоторые из величин при рационализации претерпевают изменения. Согласно приведенным в табл. П12 уравнениям ввиду уменьшения  $\epsilon_0$  и увеличения  $\mu_0$  в  $4\pi$  раз числовые значения  $D$ ,  $N$ ,

$H$ ,  $F_m$  и  $R_m$  уменьшаются в  $4\pi$  раз, а числовые значения  $m$  и  $\rho_m$  увеличиваются в  $4\pi$  раз. Но единицы этих величин при рационализации сохраняют прежние размеры. Например, единица напряженности магнитного поля

$$\text{ампер на метр} = \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}$$

не изменяется, поскольку рационализация не может повлиять на размеры ампера и метра. Поэтому числовые значения величин могут измениться лишь за счет изменения размера самих величин, т. е. путем их рационализации. Электрическое смещение, поток смещения, напряженность магнитного поля, магнитодвижущая сила и магнитное сопротивление в результате рационализации становятся в  $4\pi$  раз меньше, а магнитная масса (магнитный заряд) и момент магнитного диполя — в  $4\pi$  раз больше. Можно добавить, что ввиду неизменности единиц их когерентность не нарушается.

Казалось бы, картина рационализации предельно ясна.

Однако, к сожалению, простота исчезает, как только приходится переводить единицы из одной системы в другую. Любые таблицы перевода единиц строятся в предположении, что сами физические величины во всех системах одни и те же. Иначе пришлось бы указывать в них не один, а два переводных коэффициента — один для единицы, а другой для самой физической величины. Но этого никогда не делают. Предпочитают считать, что физические величины как бы одни и те же, а изменение их числовых значений происходит лишь за счет изменения единиц. Например, напряженность магнитного поля после рационализации предполагается как бы прежней, отнюдь не уменьшенной, а ее единица — увеличенной в  $4\pi$  раз:

$$\text{ампер на метр} = 4\pi \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}.$$

Здесь слева стоит единица напряженности магнитного поля, а справа — единица силы тока (в числителе) и единица длины (в знаменателе). Когерентность единиц при этом, разумеется, нарушается. Для взятой единицы  $[H]$  при переводе в систему СГСМ, поскольку  $1 \text{ А} = 0,1 \text{ ед. СГСМ}$  и  $1 \text{ м} = 100 \text{ см}$ , получаем

$$\text{ампер на метр} = 4\pi \cdot \frac{0,1 \text{ ед. СГСМ}}{100 \text{ см}} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ эрстед.}$$

Можно заметить, что перевод единиц напряженности магнитного поля и электрического смещения в § 20, 21 и 26 осуществляется иначе, чем других единиц, — выкладки (19), (27), (42), (43) основаны не на когерентности единиц, а на неизменности физических величин.

Таким образом, при переводе единиц из рационализованной системы в нерационализованную оказывается необходимой «двойная бухгалтерия» — фактическая рационализация физических величин подменяется как бы имеющей место рационализацией их единиц.

При рационализации изменяется вид уравнений, связывающих измененные величины с величинами, остающимися прежними. В част-

ности, изменяется написание уравнений Максвелла, выражений для плотности энергии электромагнитного поля, вектора Умова — Пойнтинга (табл. П14).

Если в нерационализованное уравнение входит величина  $\mu_0$  или  $\epsilon_0$ , а остальные из входящих в него величин при рационализации не изменяются, то достаточно заменить  $\mu_0$  на  $\mu_0/4\pi$  и  $\epsilon_0$  на  $4\pi\epsilon_0$ . Так, выражения для магнитной индукции поля прямолинейного тока и для индуктивности соленоида

$$B = \frac{2\mu_0 \mu I}{r}; \quad L = 4\pi\mu_0 \mu n^2 V$$

в результате рационализации принимают вид

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}; \quad L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

Формулы для потенциала поля точечного заряда и для емкости шара

$$\varphi = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon r}; \quad C = \epsilon_0 \epsilon R$$

в рационализованной системе пишутся в виде

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r}; \quad C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R.$$

Заметим, что  $\mu_0/4\pi = 10^{-7}$  Гн/м;  $1/(4\pi\epsilon_0) = \mu_0 c^2/4\pi \approx 9 \cdot 10^9$  Гн·м/с<sup>2</sup>.

Относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости, имеющие в нерационализованной системе вид

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa; \quad \epsilon = 1 + 4\pi\chi = 1 + 4\pi\chi_a/\epsilon_0,$$

в результате рационализации выражаются равенствами

$$\mu = 1 + \kappa; \quad \epsilon = 1 + \chi = 1 + \chi_a/\epsilon_0.$$

Как можно видеть, магнитная восприимчивость  $\kappa$  и относительная диэлектрическая восприимчивость  $\chi$  при рационализации увеличиваются в  $4\pi$  раз, а абсолютная диэлектрическая восприимчивость  $\chi_a$  не изменяется.

В табл. П14 представлены изменения, вносимые рационализацией и в другие уравнения.

Разумеется, рационализация никак не затрагивает выражений размерности электрических и магнитных величин.

Таблица III. Основные и дополнительные единицы Международной системы

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Определение
			русское	международное	
Основные единицы					
Длина	$L$	метр	м	m	Метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ с [XVII ГКМВ (1983 г.), Резолюция I]*
Масса	$M$	килограмм	кг	kg	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	$T$	секунда	с	s	Секунда равна $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция I]

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Определение
			русское	международное	
Сила электрического тока	$I$	ампер	А	А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н [МКМВ (1946 г.), Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	$\Theta$	кельвин	К	К	Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция 4]**
Количество вещества	$N$	моль	моль	mol	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]



Сила света	$J$	кандела	кд	kd	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср [XVI ГКМВ (1979 г.), Резолюция 3]
------------	-----	---------	----	----	---

Дополнительные единицы

Плоский угол	Безразмерен	радиан	рад	rad	Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	Безразмерен	стерадиан	ср	sr	Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

\* При этом определении метра скорость света в вакууме равна в точности  $299\,792\,458$  м/с.

\*\* Допускается применять также градус Цельсия  $^{\circ}\text{C}$ , по размеру равный кельвину, для выражения температуры Цельсия  $t = T - T_0$ , где  $T$  — температура Кельвина,  $T_0 = 273,15$  К. Тройная точка воды — состояние, при котором находятся в равновесии все три ее фазы: лед, жидкая вода и насыщенный пар. Равновесие трех фаз воды достигается лишь при вполне определенной температуре  $273,16$  К =  $0,01$   $^{\circ}\text{C}$ , в отличие от равновесия каких-либо двух ее фаз, которое возможно и при разных температурах.

Таблица П2. Единицы механики

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Площадь	$S=a^2$	$L^2$	квадратный метр	м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>
Объем, вместимость	$V=a^3$	$L^3$	кубический метр	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>
Кривизна	$K=1/R$	$L^{-1}$	метр в минус первой степени	м <sup>-1</sup>	м <sup>-1</sup>
Частота	$\nu=1/T$	$T^{-1}$	герц	Гц	Hz
Угловая частота, угловая скорость	$\omega=2\pi\nu=d\varphi/dt$	$T^{-1}$	радиан в секунду	рад/с	rad/s
Угловое ускорение	$\varepsilon=d\omega/dt$	$T^{-2}$	радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>	rad/s <sup>2</sup>
Скорость	$v=s/t$	$LT^{-1}$	метр в секунду	м/с	м/с
Градиент скорости	$\omega=dv/dx$	$T^{-1}$	секунда в минус первой степени	с <sup>-1</sup>	с <sup>-1</sup>
Ускорение	$a=dv/dt$	$LT^{-2}$	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>
Сила, вес	$F=ma$ $P=mg$	$LMT^{-2}$	ньютон	Н	Н
Удельный вес	$\gamma=P/V$	$L^{-2}MT^{-2}$	ньютон на кубический метр	Н/м <sup>3</sup>	Н/м <sup>3</sup>
Момент силы	$M=Fr$	$L^2MT^{-2}$	ньютон-метр	Н·м	Н·м
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	$p=F/S$ $\sigma=F/S$ $E=\sigma/\varepsilon$	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Поверхностное натяжение	$\alpha=F/l=W/S$	$MT^{-2}$	ньютон на метр	Н/м	Н/м
Жесткость	$k=F/\Delta l$	$MT^{-2}$	ньютон на метр	Н/м	Н/м
Импульс	$p=mv$	$LMT^{-1}$	ньютон-секунда	Н·с	Н·с
Момент импульса	$L=pr$	$L^2MT^{-1}$	джоуль-секунда	Дж·с	J·с
Энергия, работа	$W=Fs$	$L^2MT^{-2}$	джоуль	Дж	J

Объемная плотность энергии	$w=W/V$	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
Мощность, поток энергии	$P=W/t$	$L^2MT^{-3}$	ватт	Вт	W
Плотность потока энергии	$P_1=P/S$	$MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Действие	$H=Wt$	$L^2MT^{-1}$	джоуль-секунда	Дж·с	J·s
Плотность	$\rho=m/V$	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Градиент плотности	$\rho_1=d\rho/dx$	$L^{-4}M$	килограмм на метр в четвертой степени	кг/м <sup>4</sup>	kg/m <sup>4</sup>
Удельный объем	$v=1/\rho=V/m$	$L^3M^{-1}$	кубический метр на килограмм	м <sup>3</sup> /кг	m <sup>3</sup> /kg
Объемный расход	$Q_v=V/t$	$L^3T^{-1}$	кубический метр в секунду	м <sup>3</sup> /с	m <sup>3</sup> /s
Массовый расход	$Q_m=m/t$	$MT^{-1}$	килограмм в секунду	кг/с	kg/s
Момент инерции	$J=mr^2$	$L^2M$	килограмм-квадратный метр	кг·м <sup>2</sup>	kg·m <sup>2</sup>
Коэффициент трения качения	$k=F_r/F_n$	$L$	метр	м	m
Динамическая вязкость	$\eta = \frac{F}{S (dv/dl)}$	$L^{-1}MT^{-1}$	паскаль-секунда	Па·с	Pa·s
Кинематическая вязкость	$\nu=\eta/\rho$	$L^2T^{-1}$	квадратный метр на секунду	м <sup>2</sup> /с	m <sup>2</sup> ·s
Напряженность гравитационного поля	$g=P/m$	$LT^{-2}$	ньютон на килограмм, метр на секунду в квадрате	Н/кг, м/с <sup>2</sup>	N/kg, m/s <sup>2</sup>
Потенциал гравитационного поля	$\varphi=gs=Ps/m$	$L^2T^{-2}$	джоуль на килограмм	Дж/кг	J/kg
Коэффициент диффузии	$D = -\frac{m}{St (d\rho/dx)}$	$L^2T^{-1}$	квадратный метр на секунду	м <sup>2</sup> /с	m <sup>2</sup> /s

Таблица ПЗ. Единицы электричества и магнетизма

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Плотность электрического тока	$J=I/S$	$L^{-2} I$	ампер на квадратный метр	$A/m^2$	$A/m^2$
Электрический заряд	$q=It$	$TI$	кулон	Кл	С
Линейная плотность заряда	$\tau_1=q/l$	$L^{-1} TI$	кулон на метр	Кл/м	С/м
Поверхностная плотность заряда	$\sigma_1=q/S$	$L^{-2} TI$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	С/м <sup>2</sup>
Объемная плотность заряда	$\rho_1=q/V$	$L^{-3} TI$	кулон на кубический метр	Кл/м <sup>3</sup>	С/м <sup>3</sup>
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$\Phi=W/q$ $U=-\mathcal{E}=-\Phi_1-\Phi_2$	$L^2MT^{-3} I^{-1}$	вольт	В	V
Напряженность электрического поля	$E=F/q$	$LMT^{-3} I^{-1}$	вольт на метр	В/м	V/м
Электрическое сопротивление	$R=U/I$	$L^2MT^{-3} I^{-2}$	ом	Ом	$\Omega$
Удельное электрическое сопротивление	$\rho=RS/l$	$L^3MT^{-3} I^{-2}$	ом-метр	Ом·м	$\Omega \cdot m$
Электрическая проводимость	$G=1/R=I/U$	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	См	$\mathcal{S}$
Удельная электрическая проводимость	$\gamma=1/\rho=G/l/S$	$L^{-3} M^{-1} T^3 I^2$	сименс на метр	См/м	S/m
Электрическая емкость	$C=q/U$	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	Ф	F
Электрическое смещение (электрическая индукция)	$D=q/S=\rho_1 l$	$L^{-2} TI$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	С/м <sup>2</sup>
Поток электрического смещения	$\Phi_e=DS$	$TI$	кулон	Кл	С
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_a=\epsilon_0 \epsilon=D/E$	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$	фарад на метр	Ф/м	F/m

Электрический момент диполя	$p_e = ql$	$LI$	кулон-метр	Кл·м	С·м
Поляризованность	$P = p_e/V$	$L^{-2} TI$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	С/м <sup>2</sup>
Абсолютная диэлектрическая восприимчивость	$\chi_a = \epsilon_0 \chi = P/E$	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$	фарад на метр	Ф/м	Ф/м
Магнитная индукция	$B = F/(qv)$	$MT^{-2} I^{-1}$	тесла	Тл	Т
Магнитный поток, потокосцепление	$\Phi = BS$ $\Psi = n\Phi$	$L^2 MT^{-2} I^{-1}$	вебер	Вб	Wb
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L = \Psi/I$ $M = \Psi/I$	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$	генри	Гн	Н
Напряженность магнитного поля	$H = I/l$	$L^{-1} I$	ампер на метр	А/м	А/м
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_a = \mu_0 \mu = B/H$	$LMT^{-2} I^{-2}$	генри на метр	Гн/м	Н/м
Магнитодвижущая сила	$F_m = nI$	$I$	ампер	А	А
Магнитное сопротивление	$R_m = F_m/\Phi$	$L^{-2} M^{-1} T^2 I^2$	ампер на вебер	А/Вб	А/Wb
Магнитная проводимость	$G_m = 1/R_m = \Phi/F_m$	$L^2 MT^{-2} I^{-2}$	вебер на ампер	Вб/А	Wb/A
Магнитный момент контура с током (амперовский)	$p_m = IS$	$L^2 I$	ампер-квадратный метр	А·м <sup>2</sup>	А·м <sup>2</sup>
Магнитный момент диполя (кулоновский)	$p_m = \mu_0 IS = ml$	$L^3 MT^{-2} I^{-1}$	вебер-метр	Вб·м	Wb·м
Намагниченность	$J = p_m/V$	$L^{-1} I$	ампер на метр	А/м	А/м
Магнитная восприимчивость	$\kappa = J/H$	безразмерная	—	—	—
Гиромангнитное отношение	$\gamma = p_m/(pr)$	$M^{-1} TI$	кулон на килограмм	Кл/кг	С/кг
Первеанс (полукубическая проводимость)	$S = I/U^{3/2}$	$L^{-3} M^{-3/2} \times T^{9/2} I^{5/2}$	ампер на вольт в степени три вторых	А/В <sup>3/2</sup>	А/В <sup>3/2</sup>

Т а б л и ц а П 4. Единицы теплоты и молекулярной физики

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Градиент температуры	$T_1 = dT/ds$	$L^{-1}\Theta$	кельвин на метр	К/м	K/m
Количество теплоты, термодинамические потенциалы	$Q, W, U, H, F, G$	$L^2MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Удельное количество теплоты	$Q_m = Q/m$	$L^2T^{-2}$	джоуль на килограмм	Дж/кг	J/kg
Объемная плотность количества теплоты	$Q_v = Q/V$	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
Теплоемкость, энтропия	$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}$	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на кельвин	Дж/К	J/K
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	$c = C/m, \Delta s = \Delta S/m$	} $L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)
Объемная теплоемкость, объемная энтропия	$C/V = c_p \rho, \Delta s_0 = \Delta S/V$		} $L^{-1}MT^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на кубический метр-кельвин	Дж/(м <sup>3</sup> ·К)
Тепловой поток	$\Phi = Q/t$	$L^2MT^{-3}$		ватт	Вт
Плотность теплового потока	$q = \Phi/S$	$MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>

Теплопроводность	$\lambda = \frac{Q}{St (dT/ds)}$	$LMT^{-3} \Theta^{-1}$	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)	W/(m·K)				
Коэффициент теплообмена	$h = \Phi / (S\Delta T)$	$MT^{-3} \Theta^{-1}$	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	W/(m <sup>2</sup> ·K)				
Температуропроводность	$a = \lambda / (c_p \rho)$	$L^2 T^{-1}$	квадратный метр на секунду	м <sup>2</sup> /с	m <sup>2</sup> /s				
Температурные коэффициенты:									
длина (линейного расширения)	$\alpha = dl / (ldT)$	}	Кельвин в минус первой степени	К <sup>-1</sup>	К <sup>-1</sup>				
объема (объемного расширения)	$\beta = dV / (VdT)$					$\Theta^{-1}$			
давления	$TKp = dp / (pdT)$								
Молярная концентрация	$n = v / V$	$L^{-3} N$	моль на кубический метр	моль/м <sup>3</sup>	mol/m <sup>3</sup>				
Молярная внутренняя энергия	$u_v = U / v$	$L^2 MT^{-2} N^{-1}$	джоуль на моль	Дж/моль	J/mol				
Молярная теплоемкость, молярная энтропия, универсальная (молярная) газовая постоянная	$c_v = C / v$ $\Delta s_v = \Delta S / v$ $R = W / (v\Delta T)$	}	джоуль на моль-кельвин	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	J/(mol·K)				
Молярная масса	$M = m / v$					$MN^{-1}$	килограмм на моль	кг/моль	kg/mol
Удельная газовая постоянная	$B = vR / M = W / (m\Delta T)$					$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)
Адсорбция	$\Gamma = \Delta v / \Delta S$	$L^{-2} N$	моль на квадратный метр	моль/м <sup>2</sup>	mol/m <sup>2</sup>				
Поверхностная активность адсорбата	$G = d\alpha / dp$	$L^3 T^{-2}$	ньютон-квадратный метр на килограмм	Н·м <sup>2</sup> /кг	N·m <sup>2</sup> /kg				

Таблица П5. Единицы акустики

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Звуковое давление	$p = \omega c \rho A$	$L^{-1} MT^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Объемная скорость звука	$V_1 = vS$	$L^3 T^{-1}$	кубический метр в секунду	м <sup>3</sup> /с	m <sup>3</sup> /s
Акустическое сопротивление	$Z_a = p/V_1$	$L^{-4} MT^{-1}$	паскаль-секунда на кубический метр	Па·с/м <sup>3</sup>	Pa·s/m <sup>3</sup>
Удельное акустическое сопротивление	$Z_s = Z_a S$	$L^{-2} MT^{-1}$	паскаль-секунда на метр	Па·с/м	Pa·s/m
Механическое сопротивление акустической системы	$Z_m = F/v$	$MT^{-1}$	ньютон-секунда на метр	Н·с/м	N·s/m
Звуковая энергия	$W$	$L^2 MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Плотность звуковой энергии	$w = W/V$	$L^{-1} MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
Поток звуковой энергии	$P = W/t$	$L^2 MT^{-3}$	ватт	Вт	W
Интенсивность звука, плотность потока звуковой энергии	$I = P/S$	$MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>



Таблица П6. Единицы световые

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Яркость	$B=I/S$	$L^{-2} J$	кандела на квадратный метр	кд/м <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>
Световой поток	$\Phi=I\omega$	$J$	люмен	лм	lm
Световая энергия	$Q=\Phi t$	$TJ$	люмен-секунда	лм·с	lm·s
Светимость	$R=\Phi/S$	$L^{-2} J$	люмен на квадратный метр	лм/м <sup>2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
Освещенность	$E=\Phi/S$	$L^{-2} J$	люкс	лк	lx
Световая экспозиция	$H=Et$	$L^{-2} TJ$	люкс-секунда	лк·с	lx·s
Энергия излучения	$W$	$L^2 MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Плотность энергии излучения	$w=W/V$	$L^{-1} MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
Поток излучения	$\Phi_e=W/t$	$L^2 MT^{-3}$	ватт	Вт	W
Энергетическая сила света (сила излучения)	$I_e=\Phi_e/\omega$	$L^2 MT^{-3}$	ватт на стерадиан	Вт/ср	W/sr
Энергетическая яркость (лучистость)	$B_e=I_e/S$	$MT^{-3}$	ватт на стерадиан-квадратный метр	Вт/(ср·м <sup>2</sup> )	W/(sr·m <sup>2</sup> )
Плотность потока излучения (интенсивность излучения)	$\varphi=\Phi_e/S$	$MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Энергетическая светимость (излучательность)	$R_e = \Phi_e / S$	} $MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Энергетическая освещенность (облученность)	$E_e = \Phi_e / S$				
Энергетическая экспозиция (лучистая экспозиция)	$H_e = E_e t$	$MT^{-2}$	джоуль на квадратный метр	Дж/м <sup>2</sup>	J/m <sup>2</sup>
Спектральная световая эффективность (видность излучения)	$K_\lambda = \Phi_\lambda / \Phi_e$	$L^{-2} M^{-1} T^3 J$	люмен на ватт	лм/Вт	lm/W
Оптическая сила		$L^{-1}$	метр в минус первой степени	м <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
Линейный показатель поглощения		$L^{-1}$	метр в минус первой степени	м <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
Постоянная вращения плоскости поляризации	$\alpha = \varphi / d$	$L^{-1}$	радиан на метр	рад/м	rad/m
Удельная постоянная вращения плоскости поляризации	$\alpha_1 = \varphi / (\rho l)$	$L^2 M^{-1}$	радиан-квадратный метр на килограмм	рад·м <sup>2</sup> /кг	rad·m <sup>2</sup> /kg

Таблица П7. Единицы атомной физики и ионизирующих излучений

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Период полураспада	$T_{1/2}$	$T$	секунда	с	s
Постоянная радиоактивного распада	$\lambda = -dN/(Ndt)$	$T^{-1}$	секунда в минус первой степени	$c^{-1}$	$s^{-1}$
Дефект массы	$\Delta m$	$M$	килограмм	кг	kg
Энергия связи	$W$	$L^2MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	$A = N/t$	$T^{-1}$	беккерель	Бк	Bq
Удельная активность	$a = A/m$	$M^{-1}T^{-1}$	беккерель на килограмм	Бк/кг	Bq/kg
Объемная активность	$A_v = A/V$	$L^{-3}T^{-1}$	беккерель на кубический метр	Бк/м <sup>3</sup>	Bq/m <sup>3</sup>
Поток ионизирующих частиц	$J = N/t$	$T^{-1}$	секунда в минус первой степени	$c^{-1}$	$s^{-1}$
Плотность потока ионизирующих частиц	$\varphi = J/S$	$L^{-2}T^{-1}$	секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени	$c^{-1} \cdot m^{-2}$	$s^{-1} \cdot m^{-2}$
Энергия ионизирующего излучения	$W$	$L^2MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Поток энергии ионизирующего излучения	$P = W/t$	$L^2MT^{-3}$	ватт	Вт	W

Величина	Определяющее уравнение	Размерность	Единица		
			Наименование	Обозначение	
				русское	международное
Интенсивность (плотность потока) ионизирующего излучения	$\Psi = P/S$	$MT^{-3}$	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Поглощенная доза ионизирующего излучения, керма	$D = W/m$	} $L^2T^{-2}$	грей	Гр	Gy
Мощность поглощенной дозы, мощность кермы	$\dot{D} = D/t$				
Эквивалентная доза излучения	$\dot{K} = K/t$	$L^2T^{-2}$	зиверт	Зв	Sv
Мощность эквивалентной дозы	$D_e = QD$	$L^2T^{-3}$	зиверт в секунду	Зв/с	Sv/s
Экспозиционная доза фотонного излучения (рентгеновского и гамма-излучения)	$\dot{D}_e = D_e/t$	$M^{-1}TI$	кулон на килограмм	Кл/кг	C/kg
Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения	$X = q/m$	$M^{-1}I$	ампер на килограмм	А/кг	A/kg

Т а б л и ц а П 8. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множи- тель	Пристав- ка	Обозначение		Множи- тель	Пристав- ка	Обозначение	
		русское	между- народ- ное			русское	между- народное
$10^{18}$	экса	Э	E	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^{15}$	пета	П	P	$10^{-2}$	санги	с	c
$10^{12}$	тера	Т	T	$10^{-3}$	милли	м	m
$10^9$	гига	Г	G	$10^{-6}$	микро	мк	$\mu$
$10^6$	мега	М	M	$10^{-9}$	нано	н	n
$10^3$	кило	к	k	$10^{-12}$	пико	п	p
$10^2$	гекто	г	h	$10^{-15}$	фемто	ф	f
10	дека	да	da	$10^{-18}$	атто	а	a

Т а б л и ц а П 9. Относительные и логарифмические единицы

Наимено- вание	Обозначение		Соотношение с главной единицей	Определение
	русское	междуна- родное		

*Относительные единицы*

единица	1	1	1	—
процент	%	%	$10^{-2}$	Сотая доля
промилле	‰	‰	$10^{-3}$	Тысячная доля
миллион- ная доля	млн. <sup>-1</sup>	ppm	$10^{-6}$	Миллионная доля

*Усиление, уровень по отношению к исходному*

бел	Б	B	1 Б	Возрастание энергетической величины в 10 раз или силовой величины в $\sqrt{10} \approx 3,162$ раза
децибел	дБ	dB	0,1 Б	Возрастание энергетической величины в $\sqrt[10]{10} \approx 1,259$ раза или силовой величины в $\sqrt[20]{10} \approx 1,121$ раза
фон	фон	phon	0,1 Б	Эквивалент децибела для шумов
децилог	длог	dlg	0,1 Б (энергетический) 0,2 Б (силовой)	Возрастание в $\sqrt[10]{10} \approx 1,259$ раза

Наименование	Обозначение		Соотношение с главной единицей	Определение
	русское	международное		
непер	Нп	№	0,8686 Б	Возрастание энергетической величины в $e^2 \approx \approx 7,389$ раза или силовой величины в $e \approx 2,718$ раза

*Частотные (музыкальные) интервалы*

октава	окт	oct	1 окт	Интервал с отношением крайних частот, равным 2
цент	цент	cent	1/1200 окт	Интервал с отношением крайних частот $\sqrt[1200]{2} \approx 1,000\ 578$
декада	дек	dec	3,32 окт	Интервал с отношением крайних частот, равным 10
савар	сав	sav	$10^{-3}$ дек = =0,00332 окт = 3,99 цент	Интервал с отношением крайних частот $\sqrt[1000]{10} \approx 1,002\ 30$
тон	тон	ton	1/6 окт = =200 цент	Интервал с отношением крайних частот $\sqrt[6]{2} \approx 1,122$

*Количество информации*

бит, двончная единица	бит. дв. е.	bit (binary digit)	1 бит	Количество информации при выборе одной из двух равновероятных возможностей
байт	байт		8 бит	Количество информации при выборе одной из $2^8 = 256$ равновероятных возможностей
десятичная единица	дес. е.	dit (decimal digit)	3,32 бит	Количество информации при выборе одной из десяти равновероятных возможностей

*Яркость звезд (звездные величины)*

единица звездной величины	вел.	—	1	Уменьшение создаваемой светлом освещенности в 2,512 раза (см. § 15)
---------------------------	------	---	---	---

Таблица П10. Музыкальные интервалы

Тон (нота)		Название интервала от тона do	Натуральная гамма (чистый строй)				
Наименование	Обозначение		Отношение к частоте тона do	Отношение частот смежных нот	Интервал от тона do в саварах	Интервал от тона do в центах	Частота колебаний в первой октаве, Гц
do	C	тони́ка, уни́сон	1:1		0	0	261,000
re	D	секу́нда	9:8	9:8	51,1	204	293,625
mi	E	те́рция	5:4	10:9	96,9	386	326,250
fa	F	кварта	4:3	16:15	125,0	498	348,000
sol	G	квинта	3:2	9:8	176,1	702	391,500
la	A	секста	5:3	10:9	221,9	884	435,000
si	H	септима	15:8	9:8	273,0	1088	489,375
do	C	окта́ва	2:1	16:15	301,0	1200	522,000

Продолжение табл. П10

Тон (нота)		Темперированная гамма (хроматический строй)			Интервал между смежными нотами
Наименование	Обозначение	Интервал в саварах	Интервал в центах	Частота колебаний в первой октаве, Гц	
do	C	0	0	258,652	ТОН
re	D	50,2	200	290,327	ТОН
mi	E	100,4	400	325,881	ПОЛУТОН
fa	F	125,5	500	345,259	ТОН
sol	G	175,6	700	387,541	ТОН
la	A	225,8	900	435,000	ТОН
si	H	276,0	1100	488,271	ПОЛУТОН
do	C	301,0	1200	517,305	

**Таблица П11. Единицы, подлежащие изъятию из обращения в предусмотренные сроки**

Величина	Единица			
	Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ
		русское	международное	
Длина	ангстрем	Å	Å	$10^{-10}$ м
	икс-единица	икс-ед.	X	$1,0021 \cdot 10^{-13}$ м (приблизительно)
	микрон	мк	μ	$10^{-6}$ м
Площадь	барн	б	b	$10^{-28}$ м <sup>2</sup>
	ар	а	a	100 м <sup>2</sup>
Масса	центнер	ц	q	100 кг
Угол поворота	оборот	об	г	$2\pi$ рад = 6,28... рад
Телесный угол	квадратный градус	□°	□°	$3,0462... \cdot 10^{-4}$ ср
Ускорение	гал	Гал	Gal	0,01 м/с <sup>2</sup>
Сила, вес	дина	дин	dyn	$10^{-5}$ Н
	килограмм-сила	кгс	kgf	9,806 65 Н (точно)
	килопонд	—	kp	То же
	грамм-сила	гс	gf	$9,806 65 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
	понд	—	p	То же
	тонна-сила	тс	tf	9806,65 Н (точно)
	Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
килопонд на квадратный сантиметр		—	kp/cm <sup>2</sup>	То же
миллиметр водного столба		мм вод. ст.	mm H <sub>2</sub> O	9,806 65 Па (точно)
миллиметр ртутного столба		мм рт. ст.	mm Hg	133,322 Па
торр		—	Torr	То же
Напряженное механическое	килограмм-сила на квадратный миллиметр	кгс/мм <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	$9,806 65 \cdot 10^6$ Па (точно)
	килопонд на квадратный миллиметр	—	kp/mm <sup>2</sup>	То же



Величина	Единица			
	Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ
		русское	международное	
Работа, энергия	эрг	эрг	erg	$10^{-7}$ Дж
Мощность	лошадиная сила	л. с.	HP	735,499 Вт
Динамическая вязкость	пуаз	П	P	0,1 Па·с
Кинематическая вязкость	стокс	Ст	St	$10^{-4}$ м <sup>2</sup> /с
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	Ом·мм <sup>2</sup> /м	Ω·mm <sup>2</sup> /m	$10^{-6}$ Ом·м
Магнитный поток	максвелл	Мкс	Mx	$10^{-8}$ Вб
Магнитная индукция	гаусс	Гс	Gs	$10^{-4}$ Т
Магнитодвижущая сила	гильберт	Гб	Gb	$(10/4\pi)$ А = =0,795 775 А
	ампер-виток	ав	At	1 А
Напряженность магнитного поля	эрстед	Э	Oe	$(10^3/4\pi)$ А/м = =79,5775 А/м
Количество теплоты	калория (международная)	кал	cal	4,1868 Дж (точно)
	калория термохимическая	кал <sub>ТХ</sub>	cal <sub>th</sub>	4,1840 Дж (приблизительно)
	калория 15-градусная	кал <sub>15</sub>	cal <sub>15</sub>	4,1855 Дж (приблизительно)
Поглощенная доза излучения	рад	рад	rad, rd	0,01 Гр
Эквивалентная доза излучения	бэр	бэр	rem	0,01 Зв
Экспозиционная доза гамма- и рентгеновского излучения	рентген	Р	R	$2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно)
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри	Ки	Ci	$3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (точно)
Яркость	нит	нт	nt	1 кд/м <sup>2</sup>

**Т а б л и ц а П12. Уравнения электромагнетизма, имеющие одинаковый вид во всех системах**

Величина или физический закон	Уравнение
<p>Абсолютная магнитная проницаемость</p> <p>Абсолютная диэлектрическая проницаемость</p> <p>Связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля</p> <p>Связь между электрическим смещением и напряженностью электрического поля</p>	$\mu_a = \mu_0 \mu$ $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$ $B = \mu_0 \mu H$ $D = \epsilon_0 \epsilon E$
<p>Электрический заряд</p> <p>Потенциал электрического поля</p> <p>Электрическое напряжение</p> <p>Электродвижущая сила (ЭДС)</p> <p>Напряженность электрического поля</p> <p>Поток электрической индукции</p> <p>Работа перемещения заряда электрическим полем</p>	$q = It$ $\varphi = W/q$ $U = \varphi_1 - \varphi_2 = - \int E dl$ $\mathcal{E} = \int E dl$ $E = F/q, \quad E = - \text{grad } \varphi$ $\Psi_e = \int D dS$ $W = q(\varphi_1 - \varphi_2)$
<p>Закон Ома</p> <p>Мощность электрического тока</p> <p>Удельное электрическое сопротивление</p> <p>Электрическая проводимость</p> <p>Удельная электрическая проводимость</p>	$U = IR$ $P = IU = I^2 R = U^2/R$ $\rho = RS/l$ $G = I/U = 1/R$ $\sigma = Gl/S = 1/\rho$
<p>Связь между электрической емкостью, зарядом и напряжением</p> <p>Энергия заряженного тела</p> <p>Энергия заряженного проводника</p> <p>Энергия системы точечных зарядов</p>	$q = CU$ $W = qU/2 = CU^2/2 = q^2/2C$ $W = C\varphi^2/2$ $W = (1/2) \Delta q_i \varphi_i$
<p>Электрический момент диполя</p> <p>Поляризованность</p> <p>Абсолютная диэлектрическая восприимчивость</p> <p>Механический момент, действующий на электрический диполь</p>	$p_e = ql$ $P = p_e/V$ $\chi_a = \epsilon_0 \chi = P/E$ $M = p_e E$

Величина или физический закон	Уравнение
Магнитный поток, потокосцепление Магнитодвижущая сила Магнитное сопротивление	$\Phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{S}, \quad \Psi = n\Phi$ $F_m = \oint \mathbf{H} dl$ $R_m = F_m/\Phi$
«Магнитная масса» Магнитный момент диполя (кулоновский) Намагниченность Магнитная восприимчивость Механический момент, действующий на магнитный диполь	$m = F/H$ $p'_m = ml$ $J = p_m/V$ $\kappa = J/H$ $M = p_m H$
Линейная, поверхностная и объемная плотность электрического заряда Плотность электрического тока, уравнение непрерывности	$\tau = q/l; \quad \sigma = q/S; \quad \rho = q/V$ $J = I/S; \quad \operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$
Скорость распространения электромагнитных волн (в среде)	$v = c/\sqrt{\mu\epsilon}$

Таблица П13. Коэффициенты уравнений электромагнетизма в разных системах

Величина	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСВ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда—Лоренца
$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м	1	1	$1/c^2$	1
$\epsilon_0$	$\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ Ф/м	1	$1/c^2$	1	1
$a$	1	$4\pi$	$4\pi$	$4\pi$	1
$\mu_0 \epsilon_0$	$1/c^2$	1	$1/c^2$	$1/c^2$	1
$\gamma = c\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$	1	$c$	1	1	$c$

Таблица П14. Уравнения электромагнетизма, имеющие различное написание в разных системах

Общее выражение	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда— Лоренца
Магнитная индукция $B = \mu_0 \mu H$	$B = \mu_0 \mu H$	$B = \mu H$	$B = \mu H$	$B = \frac{\mu}{c^2} H$	$B = \mu H$
Электрическое смещение $D = \epsilon_0 \epsilon E$	$D = \epsilon_0 \epsilon E$	$D = \epsilon E$	$D = \frac{\epsilon}{c^2} E$	$D = \epsilon E$	$D = \epsilon E$
Уравнения Максвелла $\operatorname{rot} H = \frac{1}{\gamma} \left( aJ + \frac{\partial D}{\partial t} \right)$ $\operatorname{rot} E = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = a\rho$ $\operatorname{div} B = 0$	$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ $\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = \rho$ $\operatorname{div} B = 0$	" $\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \left( 4\pi J + \frac{\partial D}{\partial t} \right)$ $\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = 4\pi\rho$ $\operatorname{div} B = 0$	$\operatorname{rot} H = 4\pi J + \frac{\partial D}{\partial t}$ $\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = 4\pi\rho$ $\operatorname{div} B = 0$	$\operatorname{rot} H = 4\pi J + \frac{\partial D}{\partial t}$ $\operatorname{rot} B = -\frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = 4\pi\rho$ $\operatorname{div} B = 0$	$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \left( J + \frac{\partial D}{\partial t} \right)$ $\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$ $\operatorname{div} D = \rho$ $\operatorname{div} B = 0$

Сила Лоренца $F = qE + \frac{q}{\gamma} [vB]$	$F = qE + q[vB]$	$F = qE + \frac{q}{c} [vB]$	$F = qE + q[vB]$	$F = qE + q[vB]$	$F = qE + \frac{q}{c} [vB]$
Закон Кулона $F = \frac{a}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{c^2 q_1 q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2}$
Потенциалы $B = \mu_0 \mu H = \text{rot } A$ $E = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ причем $\text{div } A = -\frac{\gamma}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	$B = \text{rot } A$ $E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ $\text{div } A = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	$\mu H = \text{rot } A$ $E = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ $\text{div } A = -\frac{c}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	$\mu H = \text{rot } A$ $E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ $\text{div } A = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	$\frac{\mu}{c^2} H = \text{rot } A$ $E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ $\text{div } A = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	$\mu H = \text{rot } A$ $E = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$ $\text{div } A = -\frac{c}{v^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$

Общее выражение	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда—Лоренца
<p>Волновые уравнения</p> $\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 \mu \frac{a}{\gamma} J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{a\rho}{\epsilon_0 \epsilon}$	$\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 \mu J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}$	$\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{4\pi\mu}{c} J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon}$	$\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -4\pi\mu J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{4\pi c^2 \rho}{\epsilon}$	$\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{4\pi\mu}{c^2} J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon}$	$\Delta A - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{\mu}{c} J$ $\Delta \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$
<p>Теорема Гаусса</p> $\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = aq$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = q$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi q$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi q$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi q$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = q$

<p>Закон Био и Савара</p> $H = \frac{a}{4\pi\gamma} \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$	$H = \frac{1}{4\pi} \times \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$	$H = \frac{1}{c} \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$	$H = \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$	$H = \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$	$H = \frac{1}{4\pi c} \times \oint \frac{I [d\mathbf{r}]}{r^3}$
<p>Плотность энергии поля</p> $\omega = \frac{HB + ED}{2a}$	$\omega = \frac{HB + ED}{2}$	$\omega = \frac{HB + ED}{8\pi}$	$\omega = \frac{HB + ED}{8\pi}$	$\omega = \frac{HB + ED}{8\pi}$	$\omega = \frac{HB + ED}{2}$
<p>Вектор Умова — Пойнтинга</p> $S = \frac{\gamma}{a} [EH]$	$S = [EH]$	$S = \frac{c}{4\pi} [EH]$	$S = \frac{1}{4\pi} [EH]$	$S = \frac{1}{4\pi} [EH]$	$S = c [EH]$
<p>Взаимодействие двух параллельных токов</p> $F = \frac{a\mu_0}{2\pi\gamma^2} \frac{\mu I_1 I_2 l}{r}$	$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi r}$	$F = \frac{2\mu I_1 I_2 l}{c^2 r}$	$F = \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$	$F = \frac{2\mu I_1 I_2 l}{c^2 r}$	$F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi c^2 r}$
<p>Формула Ампера</p> $dF = \frac{1}{\gamma} \mu_0 M [dIH]$	$dF = \mu_0 \mu I [dIH]$	$dF = \frac{\mu}{c} I [dIH]$	$dF = \mu I [dIH]$	$dF = \frac{\mu}{c^2} I [dIH]$	$dF = \frac{\mu}{c} I [dIH]$

Общее выражение	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда— Лоренца
Уравнение Пуассона $\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$	$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$	$\Delta\varphi = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon}$	$\Delta\varphi = -\frac{4\pi c^2\rho}{\epsilon}$	$\Delta\varphi = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon}$	$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon}$
Закон полного тока $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{a}{\gamma} I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = 4\pi I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = 4\pi I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{I}{c}$
Магнитодвижущая сила $F_m = \frac{a}{\gamma} \Sigma I$	$F_m = \Sigma I$	$F_m = \frac{4\pi}{c} \Sigma I$	$F_m = 4\pi \Sigma I$	$F_m = 4\pi \Sigma I$	$F_m = \frac{I}{c} \Sigma I$
Индуктивность $L = \frac{\gamma\Psi}{I}$	$L = \frac{\Psi}{I}$	$L = \frac{c\Psi}{I}$	$L = \frac{\Psi}{I}$	$L = \frac{\Psi}{I}$	$L = \frac{c\Psi}{I}$
ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = -\frac{L}{\gamma^2} \frac{dI}{dt}$	$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt}$	$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$	$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt}$
ЭДС индукции $\mathcal{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\Psi}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Psi}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}$	$\mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Psi}{dt}$



Магнитный момент контура с током

$$\rho_m' = \frac{1}{\gamma} \mu_0 IS \text{ (кулоновский)}$$

$$\rho_m = \frac{1}{\gamma} IS \text{ (амперовский)}$$

Работа перемещения контура в магнитном поле

$$W = \frac{1}{\gamma} I \Delta \Psi$$

$$\rho_m' = \mu_0 IS$$

$$\rho_m = IS$$

$$W = I \Delta \Psi$$

$$\rho_m' = \frac{1}{c} IS$$

$$\rho_m = \frac{1}{c} IS$$

$$W = \frac{1}{c} I \Delta \Psi$$

$$\rho_m' = IS$$

$$\rho_m = IS$$

$$W = I \Delta \Psi$$

$$\rho_m' = \frac{1}{c^2} IS$$

$$\rho_m = IS$$

$$W = I \Delta \Psi$$

$$\rho_m' = \frac{1}{c} IS$$

$$\rho_m = \frac{1}{c} IS$$

$$W = \frac{1}{c} I \Delta \Psi$$

Напряженность электрического поля:

точечного заряда

$$E = \frac{aq}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$$

в плоском конденсаторе

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad \sigma = \frac{q}{S}$$

в цилиндрическом конденсаторе

$$E = \frac{\alpha \tau}{2\pi \epsilon_0 \epsilon r}, \quad \tau = \frac{q}{l}$$

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_0 \epsilon r}$$

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}$$

$$E = \frac{4\pi \sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{2\tau}{\epsilon r}$$

$$E = \frac{c^2 q}{\epsilon r^2}$$

$$E = \frac{4\pi c^2 \sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{2c^2 \tau}{\epsilon r}$$

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}$$

$$E = \frac{4\pi \sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{2\tau}{\epsilon r}$$

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon r^2}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi \epsilon r}$$

Общее выражение	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда- Лоренца
на оси диполя $E = \frac{ap_e}{2\pi\epsilon_0 \epsilon r^3}$ , $p_e = ql$ $r \gg l$	$E = \frac{p_e}{2\pi\epsilon_0 \epsilon r^3}$	$E = \frac{2p_e}{\epsilon r^3}$	$E = \frac{2c^2 p_e}{\epsilon r^3}$	$E = \frac{2p_e}{\epsilon r^3}$	$E = \frac{p_e}{2\pi\epsilon r^3}$
Емкость: шара $C = (4\pi/a) \epsilon_0 \epsilon R$	$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R$	$C = \epsilon R$	$C = \frac{\epsilon R}{c^2}$	$C = \epsilon R$	$C = 4\pi\epsilon R$
плоского конденса- тора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{ad}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi c^2 d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$	$C = \frac{\epsilon S}{d}$
цилиндрического кон- денсатора $C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{a \ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{\epsilon l}{2 \ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{\epsilon l}{2c^2 \ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{\epsilon l}{2 \ln(r_2/r_1)}$	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)}$
двухпроводной линии $b \gg R$ , $C = \frac{\pi\epsilon_0 \epsilon l}{a \ln(b/R)}$	$C = \frac{\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln(b/R)}$	$C = \frac{\epsilon l}{4 \ln(b/R)}$	$C = \frac{\epsilon l}{4c^2 \ln(b/R)}$	$C = \frac{\epsilon l}{4 \ln(b/R)}$	$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln(b/R)}$

Напряженность магнитного поля:

прямолинейного тока

$$H = \frac{aI}{2\pi r}$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$H = \frac{2I}{cr}$$

$$H = \frac{2I}{r}$$

$$H = \frac{2I}{r}$$

$$H = \frac{I}{2\pi cr}$$

в центре кругового тока

$$H = \frac{aI}{2\gamma R}$$

$$H = \frac{I}{2R}$$

$$H = \frac{2\pi I}{cR}$$

$$H = \frac{2\pi I}{R}$$

$$H = \frac{2\pi I}{R}$$

$$H = \frac{I}{2cR}$$

на оси соленоида

$$H = \frac{a}{\gamma} n_0 I, \quad n_0 = \frac{n}{l}$$

$$H = n_0 I$$

$$H = \frac{4\pi}{c} n_0 I$$

$$H = 4\pi n_0 I$$

$$H = 4\pi n_0 I$$

$$H = \frac{1}{c} n_0 I$$

Индуктивность:

соленоида

$$L = a\mu_0 \mu n_0^2 V$$

$$L = \mu_0 \mu n_0^2 V$$

$$L = 4\pi \mu n_0^2 V$$

$$L = 4\pi \mu n_0^2 V$$

$$L = \frac{4\pi}{c^2} \mu n_0^2 V$$

$$L = \mu n_0^2 V$$

двухпроводной линии

$$L = \frac{a\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{b}{R}$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{b}{R}$$

$$L = 4l \ln \frac{b}{R}$$

$$L = 4l \ln \frac{b}{R}$$

$$L = \frac{4l}{c^2} \ln \frac{b}{R}$$

$$L = \frac{l}{\pi} \ln \frac{b}{R}$$

Общее выражение	СИ	Гауссова	СГСМ, СГС $\mu_0$ , СГСБ	СГСЭ, СГС $\epsilon_0$ , СГСФ	Хевисайда-- Лоренца
Циклотронная частота $\omega_c = \frac{qB}{\gamma m}$	$\omega_c = \frac{qB}{m}$	$\omega_c = \frac{qH}{mc}$	$\omega_c = \frac{qH}{m}$	$\omega_c = \frac{qH}{mc^2}$	$\omega_c = \frac{qH}{mc}$
Учет намагничивания $B = \mu_0 (H + aJ)$ $\mu = 1 + ak$	$B = \mu_0 (H + J)$ $\mu = 1 + k$	$B = H + 4\pi J$ $\mu = 1 + 4\pi k$	$B = H + 4\pi J$ $\mu = 1 + 4\pi k$	$B = \frac{1}{c^2} (H + 4\pi J)$ $\mu = 1 + 4\pi k$	$B = H + J$ $\mu = 1 + k$
Учет поляризации $D = \epsilon_0 E + aP$ $\epsilon = 1 + a\chi$ $\chi_a = \chi\epsilon_0$	$D = \epsilon_0 E + P$ $\epsilon = 1 + \chi$ $\chi_a = \chi\epsilon_0$	$D = E + 4\pi P$ $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$ $\chi_a = \chi$	$D = \frac{E}{c^2} + 4\pi P$ $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$ $\chi_a = \frac{1}{c^2} \chi$	$D = E + 4\pi P$ $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$ $\chi_a = \chi$	$D = E + P$ $\epsilon = 1 + \chi$ $\chi_a = \chi$

Таблица П15. Выражения для постоянных атомной физики в Международной и гауссовой системах

Величина	СИ	Гауссова
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar c}$	$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$
Классический радиус электрона	$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}$	$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$
Радиус первой борховской орбиты	$a_1 = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e e^2}$	$a_1 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^3 c}$	$R_\infty = \frac{m_e e^4}{4\pi \hbar^3 c}$
Ридберг	$R_y = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2}$	$R_y = \frac{m_e e^4}{2\hbar^2}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$	$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c}$
Гиромагнитное отношение электрона	$\gamma = \frac{\mu_B}{\hbar/4\pi} = \frac{e}{m_e}$	$\gamma = \frac{\mu_B}{\hbar/2} = \frac{e}{m_e c}$

Таблица П16. Размерность электрических

Величина	Определяющее уравнение	СГС $\epsilon_0$	СГСЭ, гауссова
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_0 = \frac{q^2}{Fr^2}$	$\epsilon$	1
Сила электрического тока	$I$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$
Электрический заряд	$q = It$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
Электрический потенциал, напряжение, ЭДС	$U = \frac{A}{q}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{-1/2}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Напряженность электрического поля	$E = \frac{F}{q}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{-1/2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Электрическое сопротивление	$R = \frac{U}{I}$	$L^{-1} T \epsilon^{-1}$	$L^{-1} T$
Удельное электрическое сопротивление	$\rho_1 = \frac{RS}{l}$	$T \epsilon^{-1}$	$T$
Электрическая проводимость	$G = \frac{1}{R}$	$LT^{-1} \epsilon$	$LT^{-1}$
Электрическая емкость	$C = \frac{q}{U}$	$L \epsilon$	$L$
Электрический момент диполя	$p_e = ql$	$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{1/2}$	$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1}$
Электрическое смещение	$D = \epsilon_0 E$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \epsilon^{1/2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$

СГСМ	СГС $\mu_0$ , МКСМ	СГСФ	СИ, СГСБ
$L^{-2} T^2$	$L^{-2} T^2 \mu^{-1}$	$L^{-3} M^{-1} T^2 Q^3$	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$
$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{-1/2}$	$T^{-1} Q$	$I$
$L^{1/2} M^{1/2}$	$L^{1/2} M^{1/2} \mu^{-1/2}$	$Q$	$TI$
$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} \mu^{1/2}$	$L^2 MT^{-2} Q^{-1}$	$L^2 MT^{-3} I^{-1}$
$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2} \mu^{1/2}$	$LMT^{-2} Q^{-1}$	$LMT^{-3} I^{-1}$
$LT^{-1}$	$LT^{-1} \mu$	$L^2 MT^{-1} Q^{-2}$	$L^2 MT^{-3} I^{-2}$
$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1} \mu$	$L^3 MT^{-1} Q^{-2}$	$L^3 MT^{-3} I^{-2}$
$L^{-1} T$	$L^{-1} T \mu^{-1}$	$L^{-2} M^{-1} TQ^2$	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$
$L^{-1} T^2$	$L^{-1} T^2 \mu^{-1}$	$L^{-2} M^{-1} T^2 Q^2$	$L^{-1} M^{-1} T^4 I^2$
$L^{3/2} M^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} \mu^{-1/2}$	$LQ$	$LT I$
$L^{-3/2} M^{1/2}$	$L^{-3/2} M^{1/2} \mu^{-1/2}$	$L^{-2} Q$	$L^{-2} TI$

Таблица П17. Размерность магнитных

Величина	Определяющее уравнение	СГС $\epsilon_0$	СГСЭ
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$	$L^{-2} T^2 \epsilon^{-1}$	$L^{-2} T^2$
Магнитная индукция	$B = \frac{F}{Il}$	$L^{-3/2} M^{1/2} \epsilon^{-1/2}$	$L^{-3/2} M^{1/2}$
Магнитный поток, потокосцепление	$\Phi = BS$ $\Psi = n\Phi$	$L^{1/2} M^{1/2} \epsilon^{-1/2}$	$L^{1/2} M^{1/2}$
Индуктивность	$L = \frac{\Psi}{I}$	$L^{-1} T^2 \epsilon^{-1}$	$L^{-1} T^2$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{B}{\mu_0}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$
Магнитодвижущая сила	$F_m = \oint Hdl$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$
Магнитное сопротивление	$R_m = \frac{F_m}{\Phi}$	$LT^{-2} \epsilon$	$LT^{-2}$
«Магнитная масса»	$m = r \sqrt{\mu_0 F}$	$L^{1/2} M^{1/2} \epsilon^{-1/2}$	$L^{1/2} M^{1/2}$
Магнитный момент (кулоновский)	$p'_m = ml$	$L^{3/2} M^{1/2} \epsilon^{-1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2}$
Магнитный момент (амперовский)	$p_m = IS$	$L^{7/2} M^{1/2} T^{-2} \epsilon^{1/2}$	$L^{7/2} M^{1/2} T^{-2}$



СГСМ, гауссова	СГС $\mu_0$ , МКСМ	СГСФ	СИ, СГСБ
1	$\mu$	$LMQ^{-2}$	$LMT^{-2} I^{-3}$
$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{1/2}$	$MT^{-1} Q^{-1}$	$MT^{-2} I^{-1}$
$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{1/2}$	$L^2 MT^{-1} Q^{-1}$	$L^2 MT^{-2} I^{-1}$
$L$	$L\mu$	$L^2 MQ^{-2}$	$L^2 MT^{-2} I^{-3}$
$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{-1/2}$	$L^{-1} T^{-1} Q$	$L^{-1} I$
$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{-1/2}$	$T^{-1} Q$	$I$
$L^{-1}$	$L^{-1} \mu^{-1}$	$L^{-2} M^{-1} Q^2$	$L^{-2} M^{-1} T^2 I^3$
$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{1/2}$	$L^2 MT^{-1} Q^{-1}$	$L^2 MT^{-2} I^{-1}$
$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{1/2}$	$L^3 MT^{-1} Q^{-1}$	$L^3 MT^{-2} I^{-1}$
$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1} \mu^{-1/2}$	$L^2 T^{-1} Q$	$L^2 I$

*Длина*

ферми (Фм, Fm) =  $10^{-15}$  м  
 икс-единица (икс-ед., X) =  $1,0021 \cdot 10^{-13}$  м  
 ангстрем ( $\overset{\circ}{\text{A}}, \overset{\circ}{\text{A}})$  =  $10^{-10}$  м  
 микрон (мк,  $\mu$ ) =  $10^{-6}$  м (мкм, микрометр)  
 астрономическая единица (а. е., и. а.) =  $1,495\,98 \cdot 10^{11}$  м  
 световой год (св. год, ly) =  $9,4605 \cdot 10^{15}$  м  
 парсек, параллакс-секунда (пк, pc) =  $3,0857 \cdot 10^{16}$  м  
 фут = 12 дюймов = 0,3048 м (точно)  
 миля морская = (1/3) льё = 1852 м (точно)

*Площадь*

барн (б, в) =  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>  
 ар (а, а), сотка = 100 м<sup>2</sup>  
 гектар (га, ha) =  $10^4$  м<sup>2</sup> = 0,01 км<sup>2</sup>  
 акр = 4840 квадратных ярдов  $\approx$  40,47 га  
 квадратная миля американская  $\approx$  640 акров  $\approx$  259 км<sup>2</sup>

*Объем, вместимость*

литр (л, l, L) = дм<sup>3</sup> =  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>  
 галлон английский = 8 пинт = 4,546 л  
 бушель = 8 галлонов = 36,369 л  
 баррель нефтяной = 158,987 л

*Масса*

грамм (г, g) =  $10^{-3}$  кг  
 центнер, квинтал (ц, q) = 100 кг  
 тонна (т, t) =  $10^3$  кг  
 гамма ( $\gamma$ ) = мкг =  $10^{-9}$  кг  
 карат (кар) = 0,2 г (точно)  
 денье = 0,05 г  
 техническая единица массы (т. е. м.), инерта (и, i) = 9,806 65 кг  
 атомная единица массы (а. е. м., u) =  $1,660\,54 \cdot 10^{-27}$  кг  
 масса покоя электрона  $m_e$  =  $9,109\,390 \cdot 10^{-31}$  кг  
 фунт английский (торговый) = 16 унций = 453,592 37 г  
 унция = 16 драхм = 28,350 г  
 драхма = 3 скрупула = 30 гранов = 1,772 г  
 аптекарские единицы: фунт = 12 унций = 96 драхм = 358 г

*Время*

минута (мин, min) = 60 с  
 час (ч, h) = 60 мин = 3600 с  
 сутки (сут, d) = 24 ч = 1440 мин = 86 400 с  
 год тропический = 365 сут 5 ч 48 мин 45,44 с = 31 556 925,44 с (на 2000 г.; за 100 лет год сокращается на 0,53 с)  
 год по григорианскому календарю (новому стилю) = 365,2425 сут  
 год технический = 365 сут = 8760 ч = 525 600 мин =  $31,536 \cdot 10^6$  с

\* Английские и американские меры более полно представлены в табл. П20.

*Плоский угол*

радиан =  $360^\circ/2\pi \approx 57^\circ 17' 44,8'' \approx 57,296^\circ$   
 полный угол, оборот (об, г) =  $360^\circ = 2\pi$  рад  
 развернутый угол = 2 прямых угла =  $180^\circ = \pi$  рад  
 румб =  $(1/32)$  оборота =  $11,25^\circ = 0,19635$  рад  
 градус (... $^\circ$ ) =  $(\pi/180)$  рад =  $1,745329 \cdot 10^{-2}$  рад  
 минута (... $'$ ) =  $(1/60)$  градуса =  $2,908882 \cdot 10^{-4}$  рад  
 секунда (... $''$ ) =  $(1/60)$  минуты =  $4,848137 \cdot 10^{-6}$  рад  
 град, гон (град, ... $^g$ , gon) =  $0,01$  прямого угла =  $(\pi/200)$  рад  
 метрическая минута (... $^c$ , ... $^s$ ) =  $0,01$  града =  $0,54'$   
 метрическая секунда (... $^{cc}$ , ... $^{ss}$ ) =  $10^{-4}$  града

*Телесный угол*

полный телесный угол, сфера =  $4\pi$  ср =  $12,566371$  ср  
 прямой телесный угол =  $(1/8)$  сферы =  $(\pi/2)$  ср =  $1,570796$  ср  
 квадратный градус ( $\square^\circ$ ) =  $3,05 \cdot 10^{-4}$  ср

*Скорость*

метр в минуту =  $0,016(6)$  м/с  
 километр в час =  $0,27(7)$  м/с  
 фут в секунду =  $0,3048$  м/с (точно)  
 миля в час =  $1,609344$  км/ч =  $0,44704$  м/с  
 узел = морская миля в час =  $1,852$  км/ч =  $0,514(4)$  м/с

*Ускорение*

гал, см/с $^2$  =  $0,01$  м/с $^2$   
 миля на час-секунду =  $0,44704$  м/с $^2$   
 фут на секунду в квадрате =  $0,3048$  м/с $^2$  (точно)  
 ускорение свободного падения  $g_n$  =  $9,80665$  м/с $^2$  (точно)

*Угловая частота, скорость вращения*

радиан в секунду =  $(1/2\pi)$  Гц  
 градус в секунду =  $1,745 \cdot 10^{-2}$  рад/с =  $(1/360)$  Гц  
 оборот в секунду =  $2\pi$  рад/с

*Угловое ускорение*

оборот на секунду в квадрате =  $2\pi$  рад/с $^2$   
 оборот на минуту в квадрате =  $(\pi/1800)$  рад/с $^2$  =  $(1/3600)$  об/с $^2$

*Плотность*

грамм на кубический сантиметр = тонна на кубический метр =  $10^3$  кг/м $^3$   
 фунт на кубический фут =  $16,01846$  кг/м $^3$   
 унция на кубический фут =  $1,00116$  кг/м $^3$

*Удельный объем*

кубический сантиметр на грамм = м $^3$ /т =  $10^{-3}$  м $^3$ /кг  
 кубический фут на фунт =  $62,428 \cdot 10^{-3}$  м $^3$ /кг

*Сила*

дина (дин, dyn) = см · г · с<sup>-2</sup> = 10<sup>-5</sup> Н  
 стен, стэн (сн, sn) = м · т · с<sup>-2</sup> = 10<sup>3</sup> Н  
 грамм-сила, понд (гс) = 9,806 65 · 10<sup>-3</sup> Н (точно)  
 килограмм-сила, килопонд = 10<sup>3</sup> гс = 9,806 65 Н

*Давление, механическое напряжение*

пьеза (пз, pz) = стен на квадратный метр = 10<sup>3</sup> Па  
 бар (бар, bar), гектопьеза = 10<sup>5</sup> Па  
 бария, микробар = дин/см<sup>2</sup> = 0,1 Па  
 килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м<sup>2</sup>) = 9,806 65 Па (точно)  
 килограмм-сила на квадратный миллиметр (кгс/мм<sup>2</sup>) = 10<sup>6</sup> кгс/м<sup>2</sup>  
 миллиметр водяного столба (мм вод. ст., mm H<sub>2</sub>O) = кгс/м<sup>2</sup>  
 миллиметр ртутного столба (мм рт. ст., mm Hg) = 133,322 Па  
 торр (Тор, Torr) = мм рт. ст.  
 атмосфера техническая (ат, at) = 1 кгс/см<sup>2</sup> = 9,806 65 · 10<sup>4</sup> Па  
 атмосфера физическая (атм, atm) = 760 мм рт. ст. = 1,013 25 · 10<sup>5</sup> Па  
 фунт-сила на квадратный фут = 47,880 26 Па

*Момент силы*

дина-сантиметр (дин · см, dyn · cm) = 10<sup>-7</sup> Н · м  
 килограмм-сила-метр (кгс · м) = 9,806 65 Н · м (точно)  
 фунт-сила-фут = 1,355 82 Н · м

*Линейная плотность, толщина нити*

текс (текс, tex) = мг/м = 10<sup>-6</sup> кг/м  
 денье, единица титра = 0,05 г/(450 м) = (1/9) текс = (1/9) · 10<sup>-6</sup> кг/м

*Тонина нити*

единица метрического номера нити = м/г = 10<sup>-3</sup> текс<sup>-1</sup> = 10<sup>3</sup> м/кг

*Коэффициент влагорастворимости*

грамм на кубический сантиметр-миллиметр ртутного столба  
 [г/(см<sup>3</sup> · мм рт. ст.)] = 7,5 кг/(м<sup>3</sup> · Па)

*Коэффициент влагопроницаемости*

грамм на сантиметр-час-миллиметр ртутного столба  
 [г/(см · ч · мм рт. ст.)] = 2,08 · 10<sup>-7</sup> кг/(м · с · Па)

*Параметр Пашена*

(произведение расстояния между электродами в газе на абсолютное давление газа)

сантиметр-килограмм-сила на квадратный метр (см · кгс/м<sup>2</sup>) =  
 = 9,806 65 · 10<sup>-2</sup> Па · м (точно)  
 миллиметр ртутного столба-сантиметр (мм рт. ст. · см) = 1,333 22 Па · м  
 физическая атмосфера-сантиметр (атм · см) = 1013,25 Па · м

*Импульс*

дина-секунда (дин·с, dyn·s) = грамм-сантиметр в секунду =  $10^{-5}$  Н·с  
 грамм-сила-секунда, понд-секунда =  $9,806\ 65 \cdot 10^{-3}$  Н·с (точно)  
 фунт-сила-секунда (lbf·s) =  $4,448\ 222$  Н·с

*Энергия, работа, количество теплоты*

эрг (эрг, erg) =  $\text{см}^2\text{г}\cdot\text{с}^{-2} = 10^{-7}$  Дж  
 киловатт-час (кВт·ч) =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж  
 литр-атмосфера (л·атм) =  $101,325$  Дж  
 килограммометр (кгс·м) =  $9,806\ 65$  Дж (точно)  
 лошадиная сила-час (л.с.·ч) =  $2,647\ 796 \cdot 10^6$  Дж  
 электрон-вольт (эВ, eV) =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Дж  
 ридберг (Ry) =  $13,6$  эВ =  $2,180 \cdot 10^{-18}$  Дж  
 энергия покоя электрона =  $0,511\ 00$  МэВ =  $8,1871 \cdot 10^{-14}$  Дж  
 энергия покоя протона =  $938,27$  МэВ =  $1,5033 \cdot 10^{-10}$  Дж  
 калория международная (кал, cal) =  $4,1868$  Дж (точно)  
 калория термохимическая (кал<sub>тх</sub>, cal<sub>тх</sub>) =  $4,1840$  Дж  
 калория 15-градусная =  $4,1855$  Дж  
 калория большая =  $4186,8$  Дж  
 термия =  $4,1868 \cdot 10^6$  Дж  
 фригория =  $-4186,8$  Дж  
 тонна условного топлива (т у. т.) =  $7$  Гкал =  $2,930\ 76 \cdot 10^{10}$  Дж  
 тонна нефтяного эквивалента (тн. э., t. o. e.) =  $10$  Гкал  
 тонна тринитротолуола =  $4 \cdot 10^9$  Дж

*Действие*

эрг-секунда (эрг·с) =  $\text{см}^2\text{г}\cdot\text{с}^{-1} = 10^{-7}$  Дж·с  
 постоянная Планка  $h = 6,626\ 076 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  
 $\hbar = h/2\pi = 1,054\ 573 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

*Мощность*

эрг в секунду (эрг/с) =  $10^{-7}$  Вт  
 килограммометр в секунду (кгс·м/с) =  $9,806\ 65$  Вт (точно)  
 лошадиная сила =  $75$  кгс·м/с =  $735,499$  Вт  
 калория в секунду (кал/с) =  $4,1868$  Вт (точно)  
 килокалория в час (ккал/ч) =  $1,163$  Вт (точно)  
 фунт-сила-фут в секунду =  $1,355\ 818$  Вт

*Объемный расход*

литр в секунду (л/с) =  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с  
 литр в час (л/ч) =  $2,7(7) \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/с  
 кубический метр в час (м<sup>3</sup>/ч) =  $2,7(7) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с  
 кубический фут в секунду =  $28,3169$  л/с  
 кубический фут в минуту =  $0,471\ 948$  л/с  
 американский галлон в минуту =  $0,063$  л/с

*Массовый расход*

килограмм в минуту (кг/мин) =  $0,016(6)$  кг/с  
 килограмм в час (кг/ч) =  $2,7(7) \cdot 10^{-4}$  кг/с  
 тонна в час (т/ч) =  $0,27(7)$  кг/с  
 фунт в секунду =  $0,453\ 5924$  кг/с

## Удельный расход топлива

килограмм на киловатт-час [кг/(кВт·ч)] =  $2,7(7) \cdot 10^{-7}$  кг/Дж  
 фунт на лошадиную силу-секунду =  $0,616\ 714$  г/Дж

## Динамическая вязкость

пуаз (П, P) = г/(см·с) =  $0,1$  Па·с  
 килограмм-сила-секунда на квадратный метр (кгс·с/м<sup>2</sup>) =  $9,806\ 65$  Па·с  
 (точно)  
 килограмм-сила-час на квадратный метр (кгс·ч/м<sup>2</sup>) =  
 =  $3,530\ 394 \cdot 10^4$  Па·с (точно)  
 фунт-сила-секунда на квадратный фут, слаг на фут-секунду =  
 =  $47,880\ 25$  Па·с

## Текучесть

ре (rhe) = пуаз<sup>-1</sup> =  $10$  Па<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>

Кинематическая вязкость, коэффициент диффузии,  
температуропроводность

стокс (Ст, St) = см<sup>2</sup>/с =  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с  
 квадратный метр на час (м<sup>2</sup>/ч) =  $2,7(7) \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с  
 литр на сантиметр-секунду [л/(см·с)] =  $0,1$  м<sup>2</sup>/с  
 квадратный фут на секунду =  $9,290\ 304 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/с (точно)  
 квадратный дюйм на секунду =  $6,4516 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с (точно)  
 пуаз-кубический фут на фунт =  $6,2428 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с  
 квадратный фут на час =  $2,580\ 64 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с (точно)

Поверхностное натяжение, жесткость, ударная вязкость,  
ударная прочность

дина на сантиметр (дин/см) =  $10^{-3}$  Н/м  
 килограмм-сила на сантиметр (кгс/см) =  $980,665$  Н/м (точно)  
 грамм-сила на дюйм =  $0,386\ 089$  Н/м  
 фунт-сила-фут на квадратный дюйм =  $2101,56$  Н/м

## Момент инерции

грамм-сантиметр в квадрате (г·см<sup>2</sup>) =  $10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup>  
 килограмм-сила-метр-секунда в квадрате (кгс·м·с<sup>2</sup>) =  $9,806\ 65$  кг·м<sup>2</sup>  
 фунт-дюйм в квадрате =  $0,292\ 640$  г·м<sup>2</sup>  
 фунт-фут в квадрате =  $42,14$  г·м<sup>2</sup>  
 слаг-фут в квадрате =  $1,356$  кг·м<sup>2</sup>

## Сила электрического тока \*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(10/\zeta)$  А =  $(1/3) \cdot 10^{-9}$  А  
 био (Био, Bio), ед. СГСМ =  $10$  А

\* Для электрических и магнитных единиц переводные коэффициенты, зависящие от скорости света в вакууме ( $\zeta$ ), указаны ниже с относительной точностью порядка  $10^{-3}$ . Для получения точности не хуже  $10^{-6}$  следует подставлять:

$$\begin{array}{ll} \zeta = 2,997\ 925 \cdot 10^{10} & 1/\zeta = 0,333\ 5641 \cdot 10^{-10} \\ 4\pi = 12,566\ 371 & 1/4\pi = 7,957\ 747 \cdot 10^{-2} \\ 4\pi\zeta = 37,673\ 032 \cdot 10^{10} & 1/(4\pi\zeta) = 2,654\ 419 \cdot 10^{-12} \\ \zeta^2 = 8,987\ 552 \cdot 10^{20} & 1/\zeta^2 = 0,111\ 2650 \cdot 10^{-20} \\ 4\pi\zeta^2 = 1,129\ 409 \cdot 10^{22} & 1/(4\pi\zeta^2) = 8,854\ 188 \cdot 10^{-23} \end{array}$$

*Электрический заряд*

франклин (Фр, Fr), ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(10/\zeta)$  Кл =  $(1/3) \cdot 10^{-9}$  Кл  
 ед. СГСМ = 10 Кл  
 ампер-час (А·ч, А·h) = 3600 Кл  
 элементарный заряд  $e = 1,602\ 177 \cdot 10^{-19}$  Кл

*Плотность электрического тока*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(10^5/\zeta)$  А/м<sup>2</sup> =  $(1/3) \cdot 10^{-5}$  А/м<sup>2</sup>  
 био на квадратный сантиметр (Био/см<sup>2</sup>), ед. СГСМ =  $10^5$  А/м<sup>2</sup>  
 ампер на квадратный сантиметр (А/см<sup>2</sup>) =  $10^4$  А/м<sup>2</sup>  
 ампер на квадратный миллиметр (А/мм<sup>2</sup>) =  $10^6$  А/м<sup>2</sup>

*Объемная плотность электрического заряда*

франклин на кубический сантиметр, ед. СГС, ед. СГСЭ =  
 =  $(10^7/\zeta)$  Кл/м<sup>3</sup> =  $(1/3) \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>  
 ед. СГСМ =  $10^7$  Кл/м<sup>3</sup>  
 кулон на кубический сантиметр (Кл/см<sup>3</sup>) =  $10^6$  Кл/м<sup>3</sup>  
 кулон на кубический миллиметр (Кл/мм<sup>3</sup>) =  $10^9$  Кл/м<sup>3</sup>

*Поверхностная плотность электрического заряда*

франклин на квадратный сантиметр, ед. СГС, ед. СГСЭ =  
 =  $(10^5/\zeta)$  Кл/м<sup>2</sup> =  $(1/3) \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>  
 ед. СГСМ =  $10^5$  Кл/м<sup>2</sup>  
 кулон на квадратный сантиметр (Кл/см<sup>2</sup>) =  $10^4$  Кл/м<sup>2</sup>  
 кулон на квадратный миллиметр (Кл/мм<sup>2</sup>) =  $10^6$  Кл/м<sup>2</sup>

*Линейная плотность электрического заряда*

франклин на сантиметр, ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(10^3/\zeta)$  Кл/м =  
 =  $(1/3) \cdot 10^{-7}$  Кл/м  
 ед. СГСМ =  $10^3$  Кл/м  
 кулон на сантиметр (Кл/см) =  $10^2$  Кл/м  
 кулон на миллиметр (Кл/мм) =  $10^3$  Кл/м

*Электрический потенциал, напряжение, ЭДС*

эрг на франклин, ед. СГС, ед. СГСЭ =  $\zeta \cdot 10^{-8}$  В = 300 В  
 ед. СГСМ =  $10^{-8}$  В

*Напряженность электрического поля*

дина на франклин, ед. СГС, ед. СГСЭ =  $\zeta \cdot 10^{-6}$  В/м =  $3 \cdot 10^4$  В/м  
 ед. СГСМ =  $10^{-6}$  В/м  
 киловольт на сантиметр (кВ/см) =  $10^5$  В/м  
 вольт на дюйм (В/дюйм) = 39,37 В/м

*Электрическое смещение*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $10^5/(4\pi\zeta)$  Кл/м<sup>2</sup> =  $2,65 \cdot 10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup>  
 ед. СГСМ =  $(1/4\pi) \cdot 10^5$  Кл/м<sup>2</sup> =  $7,96 \cdot 10^3$  Кл/м<sup>2</sup>

*Поток электрического смещения*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $10/(4\pi\zeta)$  Кл =  $2,65 \cdot 10^{-11}$  Кл  
 ед. СГСМ =  $(10/4\pi)$  Кл =  $0,796$  Кл

*Электрическое сопротивление*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $\zeta^2 \cdot 10^{-9}$  Ом =  $9 \cdot 10^{11}$  Ом  
 ед. СГСМ =  $10^{-9}$  Ом

*Удельное электрическое сопротивление*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $\zeta^2 \cdot 10^{-11}$  Ом·м =  $9 \cdot 10^9$  Ом·м  
 ед. СГСМ =  $10^{-11}$  Ом·м  
 ом-квадратный миллиметр на метр (Ом·мм<sup>2</sup>/м) =  $10^{-6}$  Ом·м

*Электрическая проводимость*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(1/\zeta^2) \cdot 10^9$  См =  $(1/9) \cdot 10^{-11}$  См  
 ед. СГСМ =  $10^9$  См

*Удельная электрическая проводимость*

ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(1/\zeta^2) \cdot 10^{11}$  См/м =  $(1/9) \cdot 10^{-9}$  См/м  
 ед. СГСМ =  $10^{11}$  См/м  
 сименс-метр на квадратный миллиметр (См·м/мм<sup>2</sup>) =  $10^6$  См/м

*Электрическая емкость*

сантиметр, ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(1/\zeta^2) \cdot 10^9$  Ф =  $(1/9) \cdot 10^{-11}$  Ф  
 ед. СГСМ =  $10^9$  Ф

*Электрический момент диполя*

франклин-сантиметр, ед. СГС, ед. СГСЭ =  $(1/10\zeta)$  Кл·м =  
 =  $(1/3) \cdot 10^{-11}$  Кл·м  
 ед. СГСМ =  $0,1$  Кл·м

*Поляризованность*

франклин на квадратный сантиметр (Фр/см<sup>2</sup>), ед. СГС, ед. СГСЭ =  
 =  $(10^5/\zeta)$  Кл/м<sup>2</sup> =  $1/3 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>  
 ед. СГСМ =  $10^5$  Кл/м<sup>2</sup>

*Магнитный поток*

тесла-квадратный сантиметр (Тл·см<sup>2</sup>, Т·см<sup>2</sup>) =  $10^{-4}$  Вб  
 максвелл (Мкс, Мх), ед. СГС, ед. СГСМ =  $10^{-8}$  Вб  
 ед. СГСЭ =  $\zeta \cdot 10^{-8}$  Вб =  $300$  Вб

*Магнитная индукция*

вебер на квадратный сантиметр (Вб/см<sup>2</sup>, Wb/cm<sup>2</sup>) =  $10^4$  Тл  
 гаусс (Гс, Gs), ед. СГС, ед. СГСМ =  $10^{-4}$  Тл  
 ед. СГСЭ =  $\zeta \cdot 10^{-4}$  Тл =  $3 \cdot 10^6$  Тл



*Индуктивность*

сантиметр, ед. СГС, ед. СГСМ =  $10^{-9}$  Гн  
 ед. СГСЭ =  $\zeta^2 \cdot 10^{-9}$  Гн =  $9 \cdot 10^{11}$  Гн

*Напряженность магнитного поля*

ампер на сантиметр (А/см, А/см) = 100 А/м  
 эрстед (Э, Ое), ед. СГС, ед. СГСМ =  $(1/4\pi) \cdot 10^3$  А/м = 79,6 А/м  
 ед. СГСЭ =  $[1/(4\pi\zeta)] \cdot 10^3$  А/м =  $2,65 \cdot 10^{-9}$  А/м

*Магнитодвижущая сила*

гильберт (Гб, Gb), ед. СГС, ед. СГСМ =  $(10/4\pi)$  А = 0,796 А  
 ед. СГСЭ =  $[10/(4\pi\zeta)]$  А =  $2,65 \cdot 10^{-11}$  А  
 ампер-виток = 1 А

*Магнитное сопротивление*

магнитный ом, ед. СГС, ед. СГСМ =  $(1/4\pi) \cdot 10^9$  Гн<sup>-1</sup> =  $7,96 \cdot 10^7$  Гн<sup>-1</sup>  
 ед. СГСЭ =  $[1/(4\pi\zeta^2)] \cdot 10^9$  Гн<sup>-1</sup> =  $8,85 \cdot 10^{-14}$  Гн<sup>-1</sup>

*Магнитный момент тока (амперовский)*

ампер-квадратный сантиметр (А·см<sup>2</sup>, А·см<sup>2</sup>) =  $10^{-4}$  А·м<sup>2</sup>  
 ед. СГС, ед. СГСМ =  $10^{-8}$  А·м<sup>2</sup>  
 ед. СГСЭ =  $(1/\zeta) \cdot 10^{-8}$  А·м<sup>2</sup> =  $(1/3) \cdot 10^{-13}$  А·м<sup>2</sup>

*Магнитный момент диполя (кулоновский)*

ед. СГС, ед. СГСМ =  $4\pi \cdot 10^{-10}$  Вб·м  
 ед. СГСЭ =  $4\pi\zeta \cdot 10^{-10}$  Вб·м = 37,7 Вб·м

*Намагниченность*

ампер на сантиметр (А/см, А/см) = 100 А/м  
 ед. СГС, ед. СГСМ =  $10^3$  А/м  
 ед. СГСЭ =  $(1/\zeta) \cdot 10^3$  А/м =  $(1/3) \cdot 10^{-7}$  А/м

*Теплота удельная*

эрг на грамм (эрг/г) =  $10^{-4}$  Дж/кг  
 калория на грамм (кал/г) = 4186,8 Дж/кг (точно)

*Теплоемкость, энтропия*

эрг на кельвин (эрг/К) =  $10^{-7}$  Дж/К  
 калория на градус Цельсия (кал/°С) = 4,1868 Дж/К (точно)

*Теплоемкость объемная*

эрг на кубический сантиметр-кельвин [эрг/(см<sup>3</sup>К)] = 0,1 Дж/(м<sup>3</sup>К)  
 калория на кубический сантиметр-градус Цельсия  
 [кал/(см<sup>3</sup>·°С)] =  $4,1868 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>К) (точно)

*Удельная теплоемкость, удельная энтропия*

эрг на грамм-кельвин  $[\text{эрг}/(\text{г}\cdot\text{К})] = 10^{-4} \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$   
 калория на грамм-градус Цельсия  $[\text{кал}/(\text{г}\cdot^{\circ}\text{С})] = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

*Коэффициент теплообмена (теплопередачи, теплоотдачи)*

эрг в секунду на кельвин-квадратный сантиметр  
 $[\text{эрг}/(\text{с}\cdot\text{К}\cdot\text{см}^2)] = 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$   
 калория в секунду на градус Цельсия-квадратный сантиметр  
 $[\text{кал}/(\text{с}\cdot^{\circ}\text{С}\cdot\text{см}^2)] = 41\,868 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  (точно)

*Теплопроводность*

эрг в секунду на сантиметр-кельвин  $[\text{эрг}/(\text{с}\cdot\text{см}\cdot\text{К})] = 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$   
 калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия  
 $[\text{кал}/(\text{с}\cdot\text{см}\cdot^{\circ}\text{С})] = 418,68 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  (точно)

*Плотность теплового потока*

эрг в секунду на квадратный сантиметр  $[\text{эрг}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)] = 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$   
 калория в секунду на квадратный сантиметр  $[\text{кал}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)] =$   
 $= 41\,868 \text{ Вт}/\text{м}^2$  (точно)  
 килокалория в час на квадратный метр  $[\text{кал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)] = 1,163 \text{ Вт}/\text{м}^2$

*Градиент температуры*

кельвин на сантиметр  $(\text{К}/\text{см}) = 100 \text{ К}/\text{м}$   
 градус Фаренгейта на сантиметр  $(^{\circ}\text{F}/\text{см}) = (5/9) \cdot 100 \text{ К}/\text{м}$   
 градус Фаренгейта на дюйм  $= 21,872 \text{ К}/\text{м}$   
 градус Фаренгейта на фут  $= 1,8227 \text{ К}/\text{м}$

*Термическое сопротивление*

кельвин на эрг в секунду  $(\text{с}\cdot\text{К}/\text{эрг}) = 10^7 \text{ К}/\text{Вт}$   
 градус Цельсия на калорию в секунду  $(^{\circ}\text{С}\cdot\text{с}/\text{кал}) = 0,239 \text{ К}/\text{Вт}$   
 градус Цельсия на килокалорию в час  $(^{\circ}\text{С}\cdot\text{ч}/\text{ккал}) = 0,8598 \text{ К}/\text{Вт}$

*Удельное термическое сопротивление \**

сантиметр-кельвин на эрг в секунду  $(\text{см}\cdot\text{К}\cdot\text{с}/\text{эрг}) = 10^5 \text{ м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$

*Акустическое сопротивление*

акустический ом (аком)  $= 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$

*Удельное акустическое сопротивление*

акустический ом-квадратный сантиметр  $(\text{аком}\cdot\text{см}^2) = 10 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}$

\* Температурные шкалы Цельсия, Реомюра, Фаренгейта, Рэнкина см. в § 29.

## Механическое сопротивление

механический ом (мехом) = дин·с/см =  $10^{-8}$  Н·с/м

## Сила света

свеча Гефнера, единица Гефнера (Nefner unit) = 0,90 кд  
 единица Виоля  $\approx$  20 кд

## Яркость

стильб (сб, sb) = кд/см<sup>2</sup> =  $10^4$  кд/м<sup>2</sup>  
 апостильб (асб, asb) = (1/π) кд/м<sup>2</sup> = 0,318 310 кд/м<sup>2</sup>  
 ламберт (Лб, L) = (10<sup>4</sup>/π) кд/м<sup>2</sup> = 3183,10 кд/м<sup>2</sup>  
 кандела на квадратный фут = 10,7639 кд/м<sup>2</sup>  
 кандела на квадратный дюйм = 1550 кд/м<sup>2</sup>  
 фут-ламберт = (1/π) канделы на квадратный фут = 3,426 26 кд/м<sup>2</sup>

## Освещенность, светимость

фот, радфот-люмен на квадратный сантиметр (лм/см<sup>2</sup>) =  $10^4$  лк  
 фут-кандела-люмен на квадратный фут = 10,7639 лк

## Световая экспозиция

фот-секунда =  $10^4$  лк·с

## Активность нуклида в радиоактивном источнике

кюри (Ки, Ci) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк (точно)  
 резерфорд (Рд, Rd) =  $10^6$  Бк

## Объемная активность (концентрация) источника

кюри на литр (Ки/л) =  $3,7 \cdot 10^{13}$  Бк/м<sup>3</sup> (точно)  
 эман (Э, E) =  $10^{-10}$  Ки/л = 3700 Бк/м<sup>3</sup> (точно)  
 махе =  $13,4 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>

## Поглощенная доза ионизирующего излучения, керма

рад (рад, rad) = 0,01 Гр

## Мощность поглощенной дозы, мощность кермы

рад в секунду (рад/с) = 0,01 Гр/с

## Эквивалентная доза излучения

бэр (бэр, рем, rem) = 0,01 Зв

## Мощность эквивалентной дозы

бэр в секунду (бэр/с) = 0,01 Зв/с

## Экспозиционная доза фотонного излучения

рентген (Р, R) =  $2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг (точно)

## Мощность экспозиционной дозы

рентген в секунду (Р/с) =  $2,58 \cdot 10^{-4}$  А/кг (точно)

Таблица П19. Старые русские меры и веса

Величина	Единица	
	Наименование	Соотношение с метрическими единицами
Длина	вершок = $7/4$ дюйма аршин = 16 вершков сажень = 3 аршина верста = 500 сажений сотка = $1/10$ сажени	44,45 мм 0,7112 м 2,1336 м 1066,8 м 0,21336 м
Площадь	квадратная сажень десятина (тридцатка) = = $30 \times 80$ квадратных са- женей десятина (сороковка) = = $40 \times 80$ квадратных са- женей квадратная верста	4,55225 м <sup>2</sup> 1,09254 га 1,45672 га 113,806 га $\approx$ $\approx 1,14$ км <sup>2</sup>
Объем, вместимость 1. Меры жидкостей	шкалик, осьмушка чарка = 2 шкалика бутылка водочная = 5 ча- рок бутылка винная = $5/4$ бу- тылок водочных штоф, кружка = 2 бутыл- ки водочные четверть = 5 бутылок ведро = 10 штофов бочка = 40 ведер	0,0615 л 0,123 л 0,615 л 0,769 л 1,23 л 3,075 л 12,3 л 492 л
2. Меры сыпучих тел	гарнец четверник = 8 гарнцев мера = 4 четверика	3,28 л 26,24 л 104,95 л
Вес*	доля золотник = 96 долей лот = 3 золотника фунт = 32 лота пуд = 40 фунтов берковец = 10 пудов	44,435 мг 4,2658 г 12,797 г 409,51241 г 16,3805 кг 163,805 кг

\* В табл. П19—П20 единицы веса для наглядности выражены в единицах массы (г, кг),

Т а б л и ц а П20. Английские и американские меры

Мера	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Длина (соотношения точные)		
мил = $10^{-3}$ дюйма	mil	$25,4 \cdot 10^{-6}$ м
калибр = 0,01 дюйма	cl	0,254 мм
точка (пункт в полиграфии)	pt	0,351 46 мм
малая линия = $1/12$ дюйма	l	2,116 (6) мм
большая линия = 0,1 дюйма	l	2,54 мм
пика, цицера (в полиграфии) = 12 точек	pica	4,217 52 мм
дюйм	in	25,4 мм
хэнд = 4 дюймам	hand	0,1016 м
линк, звено цепи = 7,92 дюйма	li	0,201 168 м
пядь = 9 дюймов	span	0,2286 м
фут = 12 дюймов	ft	0,3048 м
локоть = 18 дюймов	cubit	0,4572 м
шаг = 30 дюймов	pace	0,762 м
ярд = 3 фута	yd	0,9144 м
фатом, сажень морская = 2 ярда	fath	1,8288 м
род, поль, перч = 5,5 ярда	rd	5,0292 м
чейн, мерная цепь = 22 ярда = 4 рода = 100 лииков	ch	20,1168 м
моток = 120 ярдов	skein	109,728 м
кабельтов = 0,1 морской мили	cab	185,2 м
фурлонг = 10 мерных цепей = 220 ярдов	fur	201,168 м
кабельтов (США) = 2 мотка	cab	219,456 м
миля (Великобритания) = 1760 ярдов	mi	1609,344 м
миля морская = 8 фурлонгов	n. mi	1852 м
лига законная (США) = 3 мили	st. L	4828,032 м
лига морская, льё = 3 морские мили	n. L	5556 м
миля географическая	g. mi	7420,4 м

Площадь

круговой мил	circ. mil	$506,7075 \cdot 10^{-12}$ м <sup>2</sup>
квадратный мил	mil <sup>2</sup>	$645,16 \cdot 10^{-12}$ м <sup>2</sup>
квадратный дюйм	in <sup>2</sup>	6,4516 см <sup>2</sup>
квадратный фут	ft <sup>2</sup>	0,092 903 04 м <sup>2</sup>
квадратный ярд	yd <sup>2</sup>	0,836 127 36 м <sup>2</sup>
квадратный фатом	fath <sup>2</sup>	3,344 509 44 м <sup>2</sup>
квадратный род, квадратный поль, квадратный перч	rod <sup>2</sup> , pole <sup>2</sup> , perch <sup>2</sup>	25,292 85 м <sup>2</sup>
квадратный чейн	ch <sup>2</sup>	404,6856 м <sup>2</sup>
руд = 1210 квадратных ярдов	rood	1011,714 м <sup>2</sup>
акр = 4840 квадратных ярдов	A	4046,856 м <sup>2</sup>

Мера	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
квадратная миля (США) = 640 акров	mi <sup>2</sup>	2,589 988 км <sup>2</sup>
тауншип = 36 квадратных миль	town	93,239 57 км <sup>2</sup>
круговой дюйм	circ. in	5,0671 см <sup>2</sup>
Объем, вместимость		
кубический дюйм	in <sup>3</sup>	16,3871 см <sup>3</sup>
кубический фут	ft <sup>3</sup>	28,316 85 л
кубический ярд	yd <sup>3</sup>	0,764 5549 м <sup>3</sup>
тонна регистровая = 100 кубический футов	ton reg	2,831 685 м <sup>3</sup>
корд = 128 кубических футов	cd	3,624 56 м <sup>3</sup>
кубический фathom	fath <sup>3</sup>	6,116 4389 м <sup>3</sup>
акр-фут	ac·ft	1233,482 м <sup>3</sup>
миним (Великобритания)	min	0,059 1943 см <sup>3</sup>
миним жидкостный (США)	min	0,061 6120 см <sup>3</sup>
драхма жидкостная (Великобритания) = 60 минимов	dr fl	3,551 66 см <sup>3</sup>
унция жидкостная (Великобритания) = 8 драхм	oz fl (UK)	28,4133 см <sup>3</sup>
унция жидкостная (США) = 480 минимов	oz fl	29,5738 см <sup>3</sup>
джиль (США) = 4 унции	gi (US)	118,295 см <sup>3</sup>
джиль (Великобритания) = 5 унций	gi (UK)	142,066 см <sup>3</sup>
пинта жидкостная (США) = 4 джиля	pt liq (US)	0,473 180 л
пинта сухая (США)	pt dry	0,550 610 л
пинта (Великобритания) = 4 джиля	pt (UK)	0,568 266 л
кварта жидкостная (США) = 2 пинты	qt liq (US)	0,946 353 л
кварта сухая (США) = 2 пинты	qt dry	1,101 22 л
кварта жидкостная (Великобритания) = 2 пинты	qt (UK)	1,136 53 л
бордсовый или досковый фут = 1/12 кубического фута (США, Канада)	bd ft	2359,74 см <sup>3</sup>
галлон имперский (Великобритания) = 4 кварты	gal (UK)	4,546 087 л
галлон винчестерский, жидкостный (США) = 231 кубический дюйм	gal (US)	3,785 412 л
галлон сухой (США) = 8 пинт	gal dry	4,404 884 л
пек (США) = 16 пинт сухих	pk (US)	8,809 768 л
пек или гарнец (Великобритания) = 2 галлона	pk (UK)	9,092 18 л

Мера	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
ведро (Великобритания) = 4 галлона	bucket	18,1844 л
бушель (Великобритания) = 8 галлонов	bu (UK)	36,3687 л
бушель сухой (США) = 32 кварты	bu (US)	35,239 07 л
мешок (Великобритания) = 3 бушеля	bag	109,106 л
кумб (Великобритания) = 4 бушеля	coomb	145,475 л
бочонок (Великобритания) = = 18 галлонов	kilderkin	81,8296 л
бочка (Великобритания) = 126 галлонов	butt	572,807 л
баррель сухой (США) = 105 кварт	bl dry (US)	115,628 л
баррель жидкостный (США) = = 31,5 галлона	bl (US)	119,240 л
баррель нефтяной (США) = 42 галлона	bl	158,9873 л
баррель сухой (Великобритания) = 36 галлонов	bbt dry (UK)	163,659 л
квартер (Великобритания) = 8 бушелей	quarter	290,952 л
ласт (Великобритания) = 80 бушелей	last	2,909 52 м <sup>3</sup>

## Масса, вес\*

гран (Великобритания)	gr	59,0615 мг
гран аптекарский	gr	64,7988 мг
карат метрический	c	0,2 г
скрупул аптекарский = 20 гранов аптекарских	s ap	1,295 98 г
пеннивейт = 24 грана аптекарских	pwt	1,555 17 г
драхма (Великобритания) = = 30 гранов	dr (UK)	1,771 85 г
драхма тройская, аптекарская = = 3 скрупула	dr tr, dr ap	3, 887 93 г
тонна пробирная (Великобритания)	tn as (UK)	32,6667 г
тонна пробирная (США)	tn as (US)	29,1667 г
унция = 16 драхм (Великобритания)	oz	28,349 52 г
унция тройская, аптекарская = = 8 драхм	oz tr, oz ap	31,103 48 г

\* Массе 1 кг приблизительно соответствует вес 1 кгс.

Мера	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
фунт тройский, аптекарский = = 12 унций	lb tr, lb ap	0,373 2417 кг
фунт торговый (Великобритания) = 16 унций	lb	0,453 5924 кг
стон = 14 фунтов	stone	6,350 29 кг
квартер = 25 фунтов	qr	11,3398 кг
квартер = 28 фунтов	qr	12,7006 кг
слаг	slug	14,5939 кг
квинтал (США)	quintal	46,009 кг
центнер короткий = 100 фунтов	cwt sh	45,359 24 кг
центнер длинный = 112 фунтов	cwt l	50,8023 кг
тонна короткая или судовая (США) = 2000 фунтов	tn sh	907,1847 кг
тонна длинная (Великобритания) = 2240 фунтов	tn l	1016,047 кг

## Сила, вес

гран-сила аптекарская	grf	$0,635\ 459 \cdot 10^{-3}$ Н
понд = грамм-сила	p	$9,806\ 65 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
паундаль	pdl	0,138 2550 Н
унция-сила (Великобритания)	ozf	0,278 0139 Н
фунт-сила	lbf	4,448 222 Н
килопонд = кгс	kp	9,806 65 Н (точно)
тонна-сила короткая	tnf sh	8896,44 Н
тонна-сила длинная	tnf l	9964,02 Н

## Давление, механическое напряжение

паундаль на квадратный фут	pdl/ft <sup>2</sup>	1,488 164 Па
фунт-сила на квадратный ярд	lbf/yd <sup>2</sup>	5,320 03 Па
фунт-сила на квадратный фут	lbf/ft <sup>2</sup>	47,880 26 Па
дюйм водяного столба	in H <sub>2</sub> O	249,089 Па
унция-сила на квадратный дюйм	ozf/in <sup>2</sup>	430,922 Па
фут водяного столба	ft H <sub>2</sub> O	$2,989\ 07 \cdot 10^3$ Па
дюйм ртутного столба	in Hg	$3,386\ 389 \cdot 10^3$ Па
фунт-сила на квадратный дюйм	lbf/in <sup>2</sup>	$6,894\ 758 \cdot 10^3$ Па
тонна-сила короткая на квадратный дюйм	tnf sh/in <sup>2</sup>	$13,789\ 51 \cdot 10^6$ Па
тонна-сила длинная на квадратный дюйм	tnf l/in <sup>2</sup>	$15,444\ 26 \cdot 10^6$ Па



Мера	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Работа, энергия		
паундаль-фут	pd $\cdot$ ft	42,140 12 $\cdot$ 10 <sup>-3</sup> Дж
фунт-сила-фут	lbf $\cdot$ ft	1,355 818 Дж
кубический фут-фунт-сила на квадратный дюйм	ft <sup>3</sup> $\cdot$ lbf/in <sup>2</sup>	195,2378 Дж
британская тепловая единица термохимическая	Btu <sub>th</sub>	1,054 35 $\cdot$ 10 <sup>3</sup> Дж
британская тепловая единица 15-градусная	Btu <sub>15</sub>	1,054 73 $\cdot$ 10 <sup>3</sup> Дж
британская тепловая единица (международная)	Btu	1,055 06 $\cdot$ 10 <sup>3</sup> Дж
квад = 10 <sup>15</sup> британских тепловых единиц		1,055 06 $\cdot$ 10 <sup>13</sup> Дж
кубический фут-атмосфера	ft <sup>3</sup> $\cdot$ atm	2,869 20 $\cdot$ 10 <sup>3</sup> Дж
тонна-сила-фут длинная	tnf $\cdot$ ft	3,037 03 $\cdot$ 10 <sup>3</sup> Дж
английская лошадиная сила-час	hp $\cdot$ hr	2,684 52 $\cdot$ 10 <sup>6</sup> Дж
лошадиная сила-час	HP $\cdot$ h	2,647 80 $\cdot$ 10 <sup>6</sup> Дж
баррель нефтяного эквивалента	b. o. e.	6,6 $\cdot$ 10 <sup>9</sup> Дж = = 2,9307 $\cdot$ 10 <sup>11</sup> кВт $\cdot$ ч

## Мощность

фунт-сила-фут в час	lbf $\cdot$ ft/h	376,6161 $\cdot$ 10 <sup>-6</sup> Вт
фунт-сила-фут в минуту	lbf $\cdot$ ft/min	22,596 97 $\cdot$ 10 <sup>-3</sup> Вт
паундаль-фут в секунду	pd $\cdot$ ft/s	42,140 $\cdot$ 10 <sup>-3</sup> Вт
британская тепловая единица в час	Btu/h	0,293 072 Вт
фунт-сила-фут в секунду	lbf $\cdot$ ft/s	1,355 818 Вт
британская тепловая единица в минуту	Btu/min	17,5843 Вт
лошадиная сила Уатта, английская паровая лошадь	hp; HP	745,7 Вт = = 1,0139 л. с.
лошадиная сила	HP	736 Вт = = 75 кгс $\cdot$ м/с
британская тепловая единица в секунду	Btu/s	1055,06 Вт

Таблица П21. Фундаментальные физические постоянные

Постоянная	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	$c$	299 792 458 м/с (точно)
Гравитационная постоянная	$G$	6,672 59 $\cdot$ 10 <sup>-11</sup> Н $\cdot$ м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup> (128)

Постоянная	Обозначение	Значение
Постоянная Планка	$h$	$6,626\ 0755 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (0,60)
	$\hbar = h/2\pi$	$1,054\ 572\ 66 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (0,60)
Элементарный заряд	$e$	$1,602\ 177\ 33 \cdot 10^{-19}$ Кл (0,30)
Масса: электрона	$m_e$	$9,109\ 3897 \cdot 10^{-31}$ кг (0,59)
· мюона	$m_\mu$	$1,883\ 5327 \cdot 10^{-28}$ кг (0,61)
протона	$m_p$	$1,672\ 6231 \cdot 10^{-27}$ кг (0,59)
нейтрона	$m_n$	$1,674\ 9286 \cdot 10^{-27}$ кг (0,59)
Атомная единица массы	$u$	$1,660\ 5402 \cdot 10^{-27}$ кг (0,59)
Магнитный момент:		
электрона	$\mu_e$	$928,477\ 01 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,34)
мюона	$\mu_\mu$	$4,490\ 4514 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,33)
протона	$\mu_p$	$1,410\ 607\ 61 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,34)
нейтрона	$\mu_n$	$0,966\ 237\ 07 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,41)
Магнетон Бора	$\mu_B$	$927,401\ 54 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,34)
Ядерный магнетон	$\mu_N$	$0,505\ 078\ 66 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл (0,34)
Магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума)	$\mu_0$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (точно) $12,566\ 370\ 614 \dots \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума)	$\epsilon_0$	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ (точно) $8,854\ 187\ 817 \dots \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Удельный заряд электрона	$-e/m_e$	$-1,758\ 819\ 62 \cdot 10^{11}$ Кл/кг (0,30)
Классический радиус электрона	$r_e$	$2,817\ 940\ 92 \cdot 10^{-15}$ м (0,13)
Боровский радиус	$a_1$	$0,529\ 177\ 249 \cdot 10^{-10}$ м (0,045)
Постоянная Ридберга	$R_\infty$	$10\ 973\ 731,534$ м <sup>-1</sup> (0,0012)
Ридберг	$R_y =$ $= ch R_\infty$	$2,179\ 8741 \cdot 10^{-18}$ Дж (0,60)  $13,605\ 6981$ эВ (0,30)
Постоянная тонкой структуры	$\alpha$ $1/\alpha$	$7,297\ 353\ 08 \cdot 10^{-3}$ (0,045) $137,035\ 9895$ (0,045)
Квант магнитного потока	$\Phi_0 =$ $= h/2e$	$2,067\ 834\ 61 \cdot 10^{-15}$ Вб (0,30)
Отношение Джозефсона	$2e/h$	$4,835\ 9767 \cdot 10^{14}$ Гц/В (0,30)
Гиромагнитное отношение протона	$\gamma_p$ $\gamma_p/2\pi$	$26\ 752,2128 \cdot 10^4$ с <sup>-1</sup> Тл <sup>-1</sup> (0,30) $42,577\ 469$ МГц/Тл (0,30)
Комптоновская длина волны:	$\lambda_C = h/mc$	
электрона	$\lambda_C$	$2,426\ 310\ 58 \cdot 10^{-12}$ м (0,089)
протона	$\lambda_{C, p}$	$1,321\ 410\ 02 \cdot 10^{-15}$ м (0,089)
нейтрона	$\lambda_{C, n}$	$1,319\ 591\ 10 \cdot 10^{-15}$ м (0,089)

Постоянная	Обозначение	Значение
Энергия покоя: электрона	$m_e c^2$	0,510 999 06 МэВ (0,50)
мюона	$m_\mu c^2$	105,658 389 МэВ (0,32)
протона	$m_p c^2$	938,272 31 МэВ (0,30)
нейтрона	$m_n c^2$	939,565 63 МэВ (0,30)
Отношение масс: мюона и электрона	$m_\mu/m_e$	206,768 262 (0,15)
протона и электрона	$m_p/m_e$	1836,152 701 (0,020)
нейтрона и протона	$m_n/m_p$	1,001 378 404 (0,009)
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022\ 1367 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup> (0,59)
Постоянная Фарадея	$eN_A = F$	96 485,309 Кл/моль (0,30)
Универсальная (молярная) газовая постоянная	$R$	8,314 510 Дж/(моль·К) (8,4)
Постоянная Больцмана	$k=R/N_A$	$1,380\ 658 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (8,5)
Молярный объем идеального газа ( $T=273,15$ К, $p=1$ атм= $101\ 325$ Па)	$V_m = RT/p$	22,414 10 л/моль (8,4)
Постоянная Лошмидта	$n_0 = N_A/V_m$	$2,686\ 763 \cdot 10^{25}$ м <sup>-3</sup> (8,5)
Постоянная Стефана—Больцмана	$\sigma$	$5,670\ 51 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ) (34)

Примечание. По данным СОДАТА, 1986 [5]. В скобках указана точность в миллионных долях,

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.417—81. Единицы физических величин. М.: Изд-во стандартов, 1981\*.
2. СТ СЭВ 1052—78. Метрология. Единицы физических величин. М.: Изд-во стандартов, 1979.
3. ГОСТ 16263—70. Метрология. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1978.
4. ГОСТ 15484—81. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986.
5. ГСССД 1—87. Фундаментальные физические константы. М.: Изд-во стандартов, 1988.
6. РД 50—160—79. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78. М.: Изд-во стандартов, 1979.
7. РД 50—454—84. Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81 в области ионизирующих излучений. М.: Изд-во стандартов, 1984.
8. Гаусс К. Ф. Напряжение земной магнитной силы, приведенное к абсолютной мере//Избранные труды по земному магнетизму. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 30—76.
9. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980.
10. Ершов В. С. Внедрение Международной системы единиц. М.: Изд-во стандартов, 1986.
11. Иванов В. И., Машкович В. П., Цетер Э. М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. М.: Энергоатомиздат, 1981.
12. Беклемишев А. В. Меры и единицы физических величин. М.: Гостехиздат, 1954.
13. Олейникова Л. Д. Единицы физических величин в энергетике. Точность воспроизведения и передачи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
14. Планк М. Общая механика. М.—Л.: ГТТИ, 1932. § 28.
15. Планк М. Электричество и магнетизм. М.—Л.: ГТТИ, 1933, § 7.
16. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности.— 3-е изд. М.: Наука, 1988.
17. Стоцкий Л. Р. Физические величины и их единицы. М.: Просвещение, 1984.
18. Чертов А. Г. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977.
19. Вальдиер О. А., Власов А. Д., Шальнов А. В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
20. Линейные ускорители ионов/Под ред. Б. П. Мурина. М.: Атомиздат, 1978. Т. 1.
21. Новосильцев В. Н. К истории основных единиц СИ. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1975.
22. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1988. Т. 2: Теория поля.
23. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. М.—Л.: Гостехиздат, 1948.
24. Тареев Б. М. Справочные данные о единицах физических величин//Методическое пособие для референтов и редакторов Реферативного журнала ВИНТИ. М.: ВИНТИ, 1986. С. 35—68.

\* Изменения — см. Постановление Государственного комитета по стандартам № 4457 от 17 декабря 1984 г.

# УКАЗАТЕЛЬ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## А

аном, акустический ом 101  
 акр 154, 165  
 ампер 13, 15, 120, 125  
 ампер-виток 40, 137  
 ампер-час 159  
 ангстрем 101, 136, 154  
 апостильб 99, 163  
 аптекарские единицы 154, 167, 168  
 ар 101, 136, 154  
 астрономическая единица 25, 99, 154  
 атмосфера техническая 99, 156  
 — физическая 99, 156  
 атомная единица массы 25, 99, 154

## Б

байт 134  
 бар 101, 156  
 барня 71, 101, 156  
 барн 59, 101, 136  
 баррель 154, 167  
 беккерель 63, 131  
 бел 51, 133  
 био 15, 101, 158  
 бит 134  
 боровской радиус 59, 99, 170  
 британская тепловая единица 169  
 бушель 154, 167  
 БэВ, биллэлектрон-вольт 99  
 бэр 101, 137, 163

## В

вар 25, 41  
 ватт 13, 30, 123  
 ватт-час 41, 157  
 вебер 18, 39, 125  
 верста 164  
 вершок 164  
 вольт 12, 36, 124  
 вольт-ампер 25, 41

## Г

гал 71, 101, 136, 155  
 галлон 154, 166  
 гамма (масса) 101, 153  
 гамма (напряженне магнитного поля) 99  
 гаусс 15, 77, 101, 137, 160  
 гектар 25, 101, 154  
 генри 13, 39, 125  
 герц 18, 34, 122  
 гильберт 15, 77, 137, 161  
 год 154  
 гон, град 25, 155  
 градус квадратный 136, 155

градус (угол) 25, 155  
 градус электрический 34  
 градусы температурных шкал 102  
 грамм 12, 24, 154  
 грамм-сила, понд 136, 156  
 гран 167  
 грей 65, 132

## Д

двоичная единица 134  
 дебай 99  
 декада 134  
 денье 154, 156  
 десятна 164  
 десятичная единица 134  
 децибел 51, 133  
 децилог 51, 133  
 джоуль 13, 29, 122  
 дна 12, 71, 101, 136, 156  
 диоптрия 25, 101  
 доля 164  
 драхма 154, 167  
 дюйм 154, 165

## З

звездная величина 58, 134  
 зиверт 67, 132  
 золотник 8, 164

## И

икс-единица 99, 136, 154  
 инерта, т. е. м. 99, 154

## К

кабельтов 165  
 кандела 16, 56, 121  
 калибр 165  
 калория 99, 137, 157  
 карат 99, 154, 167  
 кварта 166  
 квинтал, центнер 102, 154  
 кейзер 101  
 кельвин 18, 120  
 килограмм 15, 24, 119  
 килограммометр 157  
 килограмм-сила, килопонд 99, 136  
 кулон 13, 36, 124  
 кюри 63, 99, 137, 163

## Л

лямбда 101  
 ламберт 100, 163  
 ленц, ампер на метр 39  
 лига законная 165

лига морская 165  
линия 165  
литр 25, 101  
литр-атмосфера 157  
лот 164  
лошадиная сила, л. с. 100, 137, 157  
— Уатта, английская паровая  
лошадь 100, 169  
лье 154  
люкс 57, 129  
люмен 56, 129

## М

магн 93, 110  
магнетон Бора 170  
— ядерный 170  
максвелл 15, 77, 101, 137, 160  
махе 100, 163  
мера 164  
мерная цепь 165  
метр 9, 119  
мехом 163  
микрон, микрометр 101, 136, 154  
миллиметр водяного столба 100, 136  
— ртутного столба 100, 136, 156  
миллимикрон 24  
миллионная доля 133  
мил 165  
миля 165  
— географическая 165  
— морская 100, 154, 165  
миним 166  
минута (время) 154  
— (угол) 155  
— метрическая 155  
мо 18, 38  
моль 18, 120  
моток 165

## Н

нед 100  
непер 51, 134  
нит 102, 137  
ньютон 29, 122  
ньютон-метр 31

## О

оборот 136, 155  
— в секунду 102, 155  
октава 52, 134  
ом 12, 37, 124  
омада 12

## П

парсек, параллакс-секунда 25, 100,  
154  
паскаль 31, 122, 128  
паундаль 168  
пск 166  
переход в секунду 63  
пика, цицero 165  
пинта 166  
пойд, грамм-сила 156  
промилле 133  
процент 133  
пуаз 71, 102, 137  
пуд 164  
пункт 165  
пъеза 102, 156

## Р

рад 65, 102, 137, 163  
радиан 121, 155  
радфот 82, 163  
распад в секунду 63  
ре 158  
резерфорд 102, 163  
рентген 66, 100, 137, 163  
ридберг 59, 157, 170  
румб 100, 155

## С

савар 54, 134  
сажень 164  
— морская 165  
сантиметр (емкость) 74, 160  
— (индуктивность) 13, 77, 161  
световой год 25, 100, 154  
свеча 16, 20  
— Гефнера 163  
секунда (время) 6, 9, 12, 119  
— (угол) 25, 155  
— метрическая 155  
сило-час 100  
сименс 18, 38, 124  
скрупул 154  
слаг, слэг 168  
сотка (длина) 164  
— (площадь) 154  
стен, стэн 102, 156  
стерадиан 121  
стнльб 82, 102, 163  
стокс 71, 102, 137, 158  
сутки 25, 154

## Т

текс 102, 156  
термия 100, 157  
тесла 39, 125  
техническая единица массы 100, 134  
тон 53, 134  
тонна 25, 102, 167, 168  
— регистровая 166  
тоина-сила 100, 136  
торр, тор 100, 136, 156  
точка 165

## У

узел 100, 155  
унция 154, 167  
урановая единица 100

## Ф

фарад 12, 36, 124  
фарадей 100  
ферми 102, 154  
фон 52, 133  
фот 82, 102, 163  
франклин 15, 72, 159  
фригория 101, 157  
фунт 154, 168  
фут 154

## Ц

цент 53, 134  
цеитнер 102, 136  
цицero, пика 165

## Ч

час 154

## Э

эйиштейн 101  
электрон-вольт 25, 101, 157  
эмаи 101, 163  
эрг 12, 71, 102, 137, 157  
эрстед 15, 77, 137, 161  
этивеш 102

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Исторический обзор . . . . .</b>	<b>5</b>
1. Древние меры . . . . .	5
2. Проблема унификации и узаконения . . . . .	7
3. Метрическая система мер. Контроль . . . . .	8
4. Первые системы единиц. Проблема эталонов . . . . .	11
5. Системы СГС и МКСА. Процесс отбора и объединения систем . . . . .	15
<b>Глава 2. Международная система . . . . .</b>	<b>19</b>
6. Даты введения и нормативные акты . . . . .	19
7. Основные и производные единицы. Размерность . . . . .	19
8. Кратные и дольные, относительные и логарифмические единицы . . . . .	23
9. Применение единиц, не входящих в СИ. Употребление наименований и обозначений . . . . .	25
10. Преимущества Международной системы . . . . .	27
<b>Глава 3. Единицы Международной системы . . . . .</b>	<b>28</b>
11. Механика. Энергетические величины . . . . .	28
12. Электричество и магнетизм . . . . .	35
13. Теплота и молекулярная физика . . . . .	43
14. Акустика. Громкость и высота звука . . . . .	47
15. Свет и его восприятие . . . . .	54
16. Атомная физика . . . . .	58
17. Ионизирующие излучения . . . . .	63
<b>Глава 4. Гауссова система . . . . .</b>	<b>69</b>
18. Основные единицы и строение системы. Нормативные акты . . . . .	69
19. Механика и акустика . . . . .	70
20. Электричество . . . . .	71
21. Магнитные единицы и модификация уравнений . . . . .	74
22. Дробные показатели размерности . . . . .	78
23. Распространение системы СГС на другие области явлений . . . . .	80
24. Особенности гауссовой системы . . . . .	83
<b>Глава 5. Системы и единицы, применявшиеся в прошлом . . . . .</b>	<b>85</b>
25. Система Хевисайда—Лоренца . . . . .	85
26. Системы СГСЭ, СГСМ, СГС $\epsilon_0$ , СГС $\mu_0$ , СГСФ, СГСБ . . . . .	87

27. Системы МТС и МКГСС . . . . .	93
28. Естественные системы . . . . .	95
29. Внесистемные единицы . . . . .	98
<b>Глава 6. Общие вопросы . . . . .</b>	<b>103</b>
30. Распознавание системы единиц . . . . .	103
31. Единство систем электромагнетизма . . . . .	106
32. Анализ размерностей . . . . .	110
33. О числе основных единиц и смысле размерности . . . . .	114
34. Рационализация уравнений . . . . .	115
Приложение. Таблицы . . . . .	119
<b>Таблица П1. Основные и дополнительные единицы Между-</b>	
<b>дународной системы . . . . .</b>	<b>119</b>
Таблица П2. Единицы механики . . . . .	122
Таблица П3. Единицы электричества и магнетизма . . . . .	124
Таблица П4. Единицы теплоты и молекулярной физики . . . . .	126
Таблица П5. Единицы акустики . . . . .	128
Таблица П6. Единицы световые . . . . .	129
Таблица П7. Единицы атомной физики и ионизирующих излучений . . . . .	131
Таблица П8. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц . . . . .	133
Таблица П9. Относительные и логарифмические единицы . . . . .	133
Таблица П10. Музыкальные интервалы . . . . .	135
Таблица П11. Единицы, подлежащие изъятию из обра- щения в предусмотренные сроки . . . . .	136
Таблица П12. Уравнения электромагнетизма, имеющие однаковый вид во всех системах . . . . .	138
Таблица П13. Коэффициенты уравнений электромагнетиз- ма в разных системах . . . . .	139
Таблица П14. Уравнения электромагнетизма, имеющие различное написание в разных системах . . . . .	140
Таблица П15. Выражения для постоянных атомной фи- зики в Международной и гауссовой системах . . . . .	149
Таблица П16. Размерность электрических величин в раз- ных системах . . . . .	150
Таблица П17. Размерность магнитных величин в разных системах . . . . .	152
Таблица П18. Соотношения между единицами СИ и дру- гими единицами . . . . .	154
Таблица П19. Старые русские меры и веса . . . . .	164
Таблица П20. Английские и американские меры . . . . .	165
Таблица П21. Фундаментальные физические постоянные . . . . .	169
Список литературы . . . . .	172
Указатель единиц физических величин . . . . .	173