

ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ

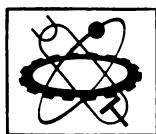
ЭЛЕКТРОНИКА



Г. Д. Глебов

**ЕДИНИЦЫ
ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН
В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Г. Д. Глебов



ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета
СССР по профессионально-
техническому образованию
в качестве учебного пособия
для средних
профессионально-
технических училищ



Москва
«Высшая школа»
1983

ББК 30.10:32.85

Г53

УДК 53.081

Рецензент — д-р техн. наук, проф. Р. Н. Сretenский

Со всеми предложениями и замечаниями просим обращаться по адресу, *101430, Москва, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

Глебов Г. Д.

Г53 Единицы физических величин в электронике: Учеб. пособие для средн. проф.-техн. училищ. — М.: Высш. шк., 1983. — 87 с., ил. — (Профтехобразование. Электронная техника).

10 к.

В книге приведены единицы физических величин, применяемые в электронной технике. В связи с переходом на Международную систему единиц излагаются и комментируются ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78) «Единицы физических величин» и методические указания по его внедрению и применению. Даны коэффициенты для перевода в СИ наиболее распространенных единиц прежних систем. Рассмотрен вопрос рационализации уравнений электромагнетизма.

Г 2403000000—195
052(01)—83 26—83

ББК 30.10:32.85

531.7:6Ф0.3

Издательство «Высшая школа», 1983

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1 января 1982 года введен в действие в качестве Государственного стандарта СССР ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин» (Л.1), созданный на основе Международной системы (СИ)* и стандарта стран—членов Совета Экономической Взаимопомощи «Метрология. Единицы физических величин» — СТ СЭВ 1052—78. Таким образом, в народном хозяйстве страны, в издательской и нормативной деятельности, а также на любых уровнях учебного процесса должны применяться только унифицированные согласно этому стандарту единицы физических величин — единицы СИ, десятичные кратные и дольные от них и строго ограниченный круг внесистемных единиц. Это требование не допускает исключений.

Стандарт не ограничивает, однако, применение тех или иных единиц в научных исследованиях и публикациях теоретического характера, например в области физики, если при этом не рассматриваются и не используются результаты практических измерений конкретных физических величин. Кроме того, стандарт не распространяется на единицы физических величин, оцениваемых по условным шкалам, например твердости (Роквелла, Мооса), светочувствительности фотоматериалов (ед. ГОСТ, ДИН), вязкости (по Энглери) и др. Наконец, восемь внесистемных единиц разрешается применять временно, и сроки их изъятия будут определены дополнительно.

Стандарт предоставляет возможность выбора русских или международных обозначений единиц.

При переходе на Международную систему единиц в области электронной техники необходимо учитывать, что параллельно осуществляется общая перестройка учения об электромагнетизме на рационализованную

* При использовании сокращенного наименования Международной системы единиц (СИ) рекомендуется произносить его «Эс-И».

форму записи уравнений, что влияет на последовательность изложения основ электротехники и изменяет расчетные формулы. В отличие от механики или молекулярной физики, где переход к единицам СИ выполняются с помощью обычных числовых множителей, рационализация уравнений электромагнетизма часто связана с изменением вида формул. Перевод самих единиц, например СГСЭ в СИ, несложен. Введение рационализированных уравнений устраняет путаницу, которая сложилась из-за параллельного существования десяти прежних систем единиц электромагнетизма: симметричной СГС, СГСЭ, СГСМ, СГС_{ε₀}, СГС_{μ₀}, СГСБ, СГСФ, МКСАн, МКС_{μ₀} и МКСАр. Именно благодаря рационализации (а не единицам СИ) упрощаются все электро- и радиотехнические расчеты.

Окончательная, т. е. утвержденная редакция стандарта, готовилась в течение весьма длительного времени. Во избежание неясностей необходимо иметь в виду, что на протяжении переходного периода — 1961—1978 гг. — в СССР были опубликованы четыре следующих официальных документа: ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц», которым устанавливалась лишь предпочтительность применения СИ, и три редакции проекта ГОСТа «Единицы физических величин» (в 1967, 1970 и 1973 гг.). С учетом отзывов и замечаний в эти документы вносились поправки и уточнения, так что все они неидентичны ГОСТ 8.417—81. Так, ГОСТ 9867—61 базировался на шести (а не на семи, как в СИ) основных физических величинах и им разрешалось использовать более широкий круг внесистемных единиц (барн, эрг, гаусс и т. д.). В дальнейшем были введены некоторые новые наименования единиц (паскаль, сименс, беккерель, грэй, зиверт), дополнительные десятичные приставки и уточнены правила по их выбору, а также написанию обозначений.

В настоящее время единственным действующим и обязательным документом является ГОСТ 8.417—81. Чтобы избежать ошибок, ни ГОСТ 9867—61, ни какие-либо упомянутые проекты использовать нельзя. С 1 января 1982 г. они, как и ГОСТ 7663—55, 7664—61, 8550—61, 8033—56, 7932—56, 8849—58, 8848—58, утратили свою силу. Нельзя в силу привычки или для наглядности возвращаться, как это иногда бывает, к единицам, не отвечающим ГОСТ 8.417—81.

Необходимо обратить внимание, что среди вышедших почти за 20-летний период справочников, учебных и методических пособий по Международной системе единиц единственной книгой, где учтены изменения и дополнения, вытекающие из утвержденного стандарта, является третье издание «Справочника по Международной системе единиц» известного советского метролога Г. Д. Бурдуна (Л.2). Руководствуясь этим справочником, необходимо тем не менее учитывать, что на момент разработки (май 1979 г.) еще допускалась к временному применению сравнительно большая группа таких внесистемных единиц, как ангстрем, центнер, дина, килограмм-сила, миллиметр ртутного столба, калория, гаусс, рентген и др. (всего 35 наименований). Сейчас срок разрешения истек, эти единицы официально упразднены и пользоваться ими даже параллельно с единицами СИ не следует.

Настоящее учебное пособие ставит цели отбора и регламентации единиц, наиболее характерных для электронной техники и производства электронных приборов. При этом приводятся как изымаемые, так и нецелесообразные в данной области, хотя и разрешенные стандартом единицы; даются основные пересчетные коэффициенты, приводятся рекомендации по выбору десятичных кратных и дольных. Предполагается, что уравнивания связи между физическими величинами рассматриваются в курсе физики. Основное внимание уделено методологии рационализации формул электромагнетизма — наиболее сложной стороне освоения Международной системы единиц.

Соотношения, необходимые для перевода в СИ других, ранее распространенных единиц, приведены в виде таблиц, построенных так, чтобы подчеркнуть, что пересчет единиц СИ в другие недопустим.

Все числовые значения приводимых пересчетных коэффициентов округлены до трех значащих цифр, что вполне достаточно для учебной и производственной практики. Более точные значения даются лишь для тех 45 коэффициентов, которые зафиксированы в таблицах внесистемных единиц ГОСТ 8.417—81, а также для соотношений между единицами времени, плоского и телесного углов и для фундаментальных физических постоянных (см. приложение).

Понятия «точно» и «приблизительно» (в таблицах) использованы в традиционном метрологическом смысле: первое как заведомо, раз и навсегда данное, а второе как допускающее дальнейшие уточнения, например: 1 кал=4,1868 Дж (точно) — в любом случае; 1 а.е.м.= $=1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно) — может быть уточнено по мере развития науки и техники.

ГЛАВА ПЕРВАЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

§ 1. Физическая величина

Под *физической величиной* (сокращенно — *величиной*) понимают «свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта» (Л.3). Например, длина, температура, мощность, магнитная индукция — физические величины. Действительно, мощность — качественно общая характеристика объектов: паровой турбины, генератора токов высокой частоты, микросхемы, но в количественном отношении мощность, например, автомобильного двигателя больше мощности люминесцентной лампы.

Физические величины имеют наименования и обозначения. *Наименование физической величины* должно представлять сущность отображаемого свойства. Для каждой физической величины следует применять одно наименование (термин), как правило, в соответствии с Методическими указаниями по внедрению и применению СТ СЭВ 1052—78 (Л.4), где приведен перечень наименований величин, относящихся к различным предметам и явлениям. Таковы, например, площадь, плотность, коэффициент фазы, температуропроводность, электрическое смещение, световая экспозиция и др. Для величин, не содержащихся в (Л.4), рекомендуется использовать термины из справочников (Л.5,6). Недопустимы наименования, в которых приводятся:

физические величины в качестве характеристик других физических величин, например объем массы газа (правильно — удельный объем);

физические величины, содержащие количественные характеристики, например площадь поверхности 100 г адсорбента (правильно—площадь поверхности адсорбента массой 100 г);

слово «величина» в сочетании с наименованием физической величины, например величина температуры, поскольку температура сама является величиной;

слово «величина» вместо «размер», например, величина гранул равна 2,4 мм (правильно—размер гранул равен 2,4 мм).

Нельзя также применять одно и то же наименование для различных величин, особенно выражаемых в разных единицах одной и той же системы, например использовать термин «нагрузка» (в килограммах) как синоним давления (в паскалях). Вводя определение величины, не следует допускать упоминания ее единиц, так как физический смысл величины не должен зависеть от их выбора.

Правильно:

Плотность — величина, определяемая отношением массы вещества к занимаемому им объему

Неправильно:

Плотность — величина, определяемая массой единицы объема

Указания на условия измерений (если они имеются) должны входить в наименование самой величины, а не в наименование и обозначение ее единиц.

Краткой формой наименования физической величины, предназначенной для записи в формулах, на графиках, при сокращениях, является ее *обозначение (символ)*. Для обозначений физических величин принято использовать буквы латинского и греческого алфавитов. Их пишут наклонно (курсивом), например объем V , яркость L_v , плотность ρ , поток электрического смещения Ψ .

Буквенные обозначения важнейших физических и общетехнических величин (символы) установлены ГОСТами и приводятся в справочниках (Л.2, 5, 6 и 7).

Нельзя путать наименования и обозначения физических величин с наименованиями и обозначениями единиц физических величин.

Под *единицей физической величины* (единицей) понимают физическую величину, которой по определению присвоено числовое значение 1. Иначе, это величина

фиксированного размера, принятая по соглашению в качестве основы для количественной оценки конкретных физических величин. Так, единицами массы являются килограмм, грамм, тонна. Применять прежний термин «единица измерения физической величины» не рекомендуется.

Оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц называется *значением физической величины*, причем входящее сюда отвлеченное число именуют числовым значением. Так, для электрического напряжения 220 В имеем: 220 — числовое значение напряжения; вольт (В) — принятая в данном случае единица напряжения; 220 В — значение напряжения.

Совокупность взаимосвязанных физических величин составляет *систему физических величин*, а соответствующая ей и образованная по определенным принципам совокупность единиц — *систему единиц физических величин*, которая состоит из основных и производных единиц*. Под *основной единицей* физической величины понимают такую единицу, которая при построении системы выбирается произвольно и не зависит от других единиц данной системы. *Производная единица* физической величины образуется по определяющему эту единицу уравнению из других: основных, дополнительных и производных единиц, имеющих специальные наименования. Если производная единица связана с другими единицами данной системы уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1, она является *когерентной*. Система, все производные единицы которой когерентны, представляет собой *когерентную систему единиц физических величин*. Важным признаком и преимуществом когерентных систем (к числу которых принадлежит СИ) является то, что при подстановке в любую физическую формулу числовых значений величин в единицах данной системы искомый результат вычислений (ответ) будет выражен в единицах той же системы без использования каких-либо пересчетных или соглашающих коэффициентов.

* Две безразмерные единицы СИ — радиан (единица плоского угла) и стерадиан (единица телесного угла) не принадлежат ни к основным, ни к производным единицам. Их называют дополнительными единицами.

Единицу, не входящую в данную систему, например в СИ, называют *внесистемной единицей*. Наконец, единица, в целое число раз большая системной (или внесистемной), является *кратной единицей*, а в целое число раз меньшая — *дольной единицей*. Предпочтительно кратные и дольные единицы образуют по десятичному принципу. Однако в ряде случаев существуют другие множители кратности (дольности), например 360, 60 или 24. Кратные и дольные от системных единиц в когерентную систему не входят.

Единицы физических величин также имеют свои наименования и обозначения, которые стандартизованы и должны в точности соответствовать требованиям ГОСТ 8.417—81.

§ 2. Определяющее уравнение. Пересчетные коэффициенты

Физические величины — свойства систем, состояний или процессов — так или иначе связаны между собой. Эти объективные полностью или лишь частично известные связи — можно представить уравнениями связи в виде алгебраических произведений, которые показывают, как одна физическая величина x выражается через другие, например a , b , c ,

$$x = k a^{\alpha} b^{\beta} c^{\gamma},$$

где α , β , γ — отвлеченные числа; k — коэффициент пропорциональности.

Уравнения в виде суммы $x = k (a^{\alpha} + b^{\beta} + c^{\gamma})$ встречаются редко. Первое из приведенных уравнений может отражать какой-либо основной физический или геометрический закон. Такие простейшие уравнения связи называют *определяющими*, так как в них отсутствуют коэффициенты, зависящие от единиц, в которых выражены физические величины. Как правило, коэффициент k определяющего уравнения безразмерен и равен 1, например:

сила, определенная через массу m и ускорение a ,

$$F = ma;$$

магнитная индукция, выраженная через поток магнитной индукции Φ и площадь поверхности A ,

$$B = \Phi / A.$$

В некоторых случаях безразмерный коэффициент отличается от единицы:

кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v ,

$$E = 1/2 \cdot mv^2;$$

объем сферы радиусом r

$$V = 4/3 \cdot \pi r^3.$$

Такие случаи немногочисленны и встречающиеся в них коэффициенты обычно являются числами 2, 3, π или простейшими сочетаниями их между собой и единицей: $1/2$, $2/3$, $(2^2/3)$, π , 2^3 , $\sqrt{3}$.

В связи с особенностями построения систем физических величин коэффициент k может быть также размерным, тогда он представляет собой универсальную физическую постоянную, например:

сила притяжения двух тел массой m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где $k = G = 6,672 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² — гравитационная постоянная;

молярный объем идеального газа при температуре T и давлении p

$$V_m = RT/p,$$

где $k = R = 8,314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная.

При использовании единиц физических величин, относящихся к различным прежним системам единиц, уравнения связи могут включать произвольные коэффициенты, значения которых отражают соотношения между размерами единиц. Примерами таких уравнений являются:

зависимость быстроты откачки механического вакуумного насоса S (м³/с) от объема рабочей камеры V (л) и частоты вращения ротора n (об/мин)

$$S = \frac{10^{-3}}{60} nV;$$

зависимость площади круга A (м²) от его радиуса r (дюймы)

$$A = 2,027 \cdot 10^{-3} r^2;$$

выражение молярного объема идеального газа V_m (л/моль) через его температуру T (К) и давление p (атм):

$$V_m = 0,082 \frac{T}{p}.$$

Чтобы использовать в таких формулах единицы СИ, необходимо пересчитать числовые коэффициенты. Существуют различные правила такого пересчета. Простейшее из них состоит в том, что каждое буквенное обозначение входящей в формулу величины (как в правой, так и в левой ее частях) делят на множитель для перевода данной единицы в единицу СИ, а затем все множители объединяют в один. Тем самым исходное выражение переходит в уравнение связи с обычными коэффициентами. Таким образом, в приведенных примерах получается:

$$1 \text{ об/мин} = 0,016(6) \text{ с}^{-1}, \quad 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$\frac{S}{1} = \frac{10^{-3}}{60} \cdot \frac{n}{0,016(6)} \cdot \frac{V}{10^{-3}},$$

$$\text{откуда } S = nV \text{ (при } k=1);$$

$$1 \text{ дюйм} = 0,0254 \text{ м},$$

$$\frac{A}{1} = 2,027 \cdot 10^{-3} \left(\frac{r}{0,0254} \right)^2 = 3,141 r^2,$$

$$\text{откуда } A = \pi r^2 \text{ (при } k=\pi);$$

$$1 \text{ л/моль} = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}, \quad 1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па},$$

$$\frac{V_m}{10^{-3}} = 0,082 \frac{T}{1} \cdot \frac{1 \cdot 101325}{p},$$

$$V_m = 8,31 \frac{T}{p}, \text{ где } k=R=8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Иногда в технике используют эмпирические формулы, которые, не отражая природу явлений, описывают лишь частные количественные зависимости между числовыми значениями величин. Эти формулы нельзя рассуждать как физические законы и поэтому не следует придавать входящим в них символам и числовым коэффициентам смысл размерных величин, т. е. размерности правой и левой частей формулы могут не совпадать. Такими примерами являются:

формула, определяющая коэффициент теплопередачи при пузырьковом кипении воды,

$$\alpha = 3,0 p^{0,15} q^{0,70},$$

где α — в ккал/(м²·ч·К); давление p — в ат; плотность теплового потока q — в ккал/(м²·ч);

формула расчета гидравлического уклона трубопровода

$$i = 0,0179 \nu^{0,25} Q^{1,75} / d^{4,75},$$

где i — величина безразмерная; ν — кинематическая вязкость жидкости, Ст; Q — объемная пропускная способность трубопровода, м³/сут; d — внутренний диаметр трубопровода, см.

Если хотя бы одна из входящих в подобную формулу величин выражена единицей, не соответствующей СИ, для использования единиц СИ необходим перерасчет числового коэффициента. Для этого можно прибегнуть к тому же правилу, что и выше. Так, в первом примере:

$$1 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 1,163 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$1 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 1,163 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Таким образом,

$$\alpha / 1,163 = 3,0 [p / (9,81 \cdot 10^4)^{0,15}] (q / 1,163)^{0,70}.$$

Следовательно, при использовании единиц СИ

$$\alpha = 0,56 p^{0,15} q^{0,70}.$$

Во втором примере:

$$1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$1 \text{ м}^3/\text{сут} = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м};$$

$$i / 1 = 0,0179 (\nu / 10^{-4})^{0,25} \cdot [Q / (11,6 \cdot 10^{-6})^{1,75}] (d / 10^{-2})^{4,75};$$

$$i = 0,0246 \nu^{0,25} Q^{1,75} / d^{4,75},$$

где i — величина безразмерная; ν — в м²/с; Q — в м³/с; d — в м.

При действиях с константами уравнения, записанные применительно к СИ, также могут содержать различные числовые коэффициенты. Так, среднеарифметическая скорость (м/с) газовых частиц

$$v = \sqrt{8RT/\pi M},$$

где T — температура, К; M — молярная масса газа, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К). Отсюда можно получить следующую расчетную формулу

$$v = 4,60 \sqrt{T/M}.$$

Однако, если для такой формулы не даны единицы величин v , T и M , ею пользоваться нельзя. Поэтому принадлежность тех или иных уравнений к СИ или единицы содержащихся в них величин должны обязательно указываться.

§ 3. Номенклатура и применение единиц физических величин

Единицы физических величин, унифицированные согласно ГОСТ 8.417—81, делятся на три группы:

- единицы Международной системы (СИ);
- внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ;
- внесистемные единицы, допускаемые к применению временно.

Единицы СИ, а также десятичные кратные и дольные от них подлежат обязательному применению. Единицами СИ являются семь основных (табл. 1), две дополнительные (табл. 2) и любые их когерентные производные.

Таблица 1. Основные единицы СИ

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	
		международное	русское
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
Сила электрического тока	ампер	A	А
Термодинамическая температура	кельвин	K	К
Количество вещества	моль	mol	моль
Сила света	кандела	cd	кд

Примечание. Кроме температуры Кельвина (символ T), допускается применять температуру Цельсия (символ t), определяемую выражением $t = T - 273,15$ (точно). По размеру градус Цельсия равен кельвину.

Дополнительные единицы безразмерны, однако входят в обозначения производных (например, рад/с, кд·ср).

Т а б л и ц а 2. Дополнительные единицы СИ

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	
		международное	русское
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср

Число когерентных производных СИ неопределенно велико. Для восемнадцати из них (в механике, электромагнетизме, светотехнике и области ионизирующих излучений) установлены специальные наименования (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования

Наименование величины	Единица			Выражение через другие единицы СИ
	наименование	международное	русское	
Частота	герц	Hz	Гц	s^{-1}
Сила, вес	ньютон	N	Н	$кг \cdot м/с^2$
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	паскаль	Pa	Па	$Н/м^2$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	J	Дж	$Н \cdot м = В \cdot А \cdot с$
Мощность, поток энергии	ватт	W	Вт	$Дж/с$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	V	В	$Вт/А$
Количество электричества (электрический заряд)	кулон	C	Кл	$А \cdot с$
Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	$В/А$
Электрическая проводимость	сименс	S	См	$Ом^{-1}$
Электрическая емкость	фарад	F	Ф	$Кл/В$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	вебер	Wb	Вб	$В \cdot с$
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	H	Гн	$Вб/А$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	тесла	T	Тл	$Вб/м^2$
Световой поток	люмен	lm	лм	$кд \cdot ср$
Освещенность	люкс	lx	лк	$лм/м^2$

Продолжение табл. 3

Наименование величины	Единица			Выражение через другие единицы СИ
	наименование	обозначение		
		между- народ- ное	рус- ское	
Активность нуклида в радио- активном источнике	беккерель	Bq	Бк	с ⁻¹
Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы	грэй	Gy	Гр	Дж/кг
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Sv	Зв	Дж/кг

Единицы, имеющие специальные наименования, могут быть, в свою очередь, использованы для образования других производных, как соответствующих СИ [например, Па·с, Гн/м, Дж/(кг·К)], так и в разрешенных сочетаниях с внесистемными.

Допускается использовать наравне с единицами СИ без каких-либо ограничений срока и области применения внесистемные единицы, приведенные в табл. 4—6.

Таблица 4. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единицы			
	наименование	обозначение		Соотношение с единицей СИ
		между- народ- ное	рус- ское	
Масса	тонна	t	т	10^3 кг
Время	минута	min	мин	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	градус	...°	...°	$1,745329 \dots \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...'	...'	$2,908882 \dots \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	..."	..."	$4,848137 \dots \cdot 10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	литр	l	л	10^{-3} м³

Примечания: 1. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.

2. Единицу литр при точных измерениях использовать не рекомендуется.

Таблица 5. Внесистемные единицы, относящиеся к области электронной техники и допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		Соотношение с единицей СИ
		международное	русское	
Оптическая сила	диоптрия	—	дптр	1 м^{-1}
Масса	атомная единица массы	и	а.е.м.	$1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ (приблизительно)
Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	$1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (приблизительно)
Полная мощность	вольт-ампер	V·A	В·А	—
Реактивная мощность	вар	вар	вар	—

При этом в табл. 5 включены те единицы, которые, как правило, используют в области электронной техники. Остальные, допускаемые к неограниченному применению ГОСТ 8.417—81, внесистемные единицы, а именно: град (гон), астрономическая единица, световой год, парсек, гектар, в электронике не используются и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Табл. 6 требует некоторых пояснений. Относительная величина представляет собой безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную, например, кпд, относительное удлинение, массовая или молярная доля, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная восприимчивость.

Логарифмическая величина — есть логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической, принимаемой за исходную. Таковы, например, разность уровней мощности, усиление, ослабление, уровень звукового давления в акустике и т. п. Если необходимо, оговаривается характер физической величины или фиксируется ее исходное значение.

Логарифмические единицы бел и децибел определяют двумя способами: по отношению энергетических или силовых величин. При первом способе 1 Б соответствует такому отношению двух одноименных энергетических величин P (энергия, мощность, плотность энергии и т. п.), десятичный логарифм кото-

Таблица 6. внесистемные относительные и логарифмические единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Единица			Определение	
наименование	обозначение		общее	числовое
	международное	русское		
Процент	%	%	Одна сотая доля	10^{-2}
Промилле	‰	‰	Одна тысячная доля	10^{-3}
Миллионная доля	ppm	млн ⁻¹	Одна миллионная доля	10^{-6}
Бел	В	Б	Безразмерное отношение двух одноименных энергетических величин (P), десятичный логарифм которого равен единице, или безразмерное отношение двух одноименных силовых величин (F), удвоенный десятичный логарифм которого равен единице	$1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$ $1 \text{ Б} = 2 \lg(F_2/F_1)$ при $F_2/F_1 = \sqrt{10}$
Децibel	db	дБ	Одна десятая доля бела	0,1 Б
Октава	—	окт	Частотный интервал между двумя частотами (ν), логарифм отношения которых при основании два равен единице	$1 \text{ окт} = \log_2(\nu_2/\nu_1)$ при $\nu_2/\nu_1 = 2$
Декада	—	дек	Частотный интервал между двумя частотами (ν), десятичный логарифм отношения которых равен единице	$1 \text{ дек} = \lg(\nu_2/\nu_1)$ при $\nu_2/\nu_1 = 10$
Фон	phon	фон	Уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Гц равен 1 дБ	—

рого равен единице и, следовательно, сами величины отличаются на порядок.

Рассматривая второй способ, следует иметь в виду, что энергетические величины могут выступать в форме произведения двух сопряженных силовых:

$$P = I \epsilon,$$

одна из которых I представляет собой так называемую интенсивную, а другая ϵ — экстенсивную. Такими пара-

ми, например, являются механическая сила — путь, давление — объем, электрический потенциал — заряд, температура — энтропия и т. д.

Поскольку эти величины связаны между собой функциональной зависимостью $I = \varphi(\varepsilon)$ и $\varepsilon = \Psi(I)$ (как, например, в известном уравнении состояния идеального газа при постоянной температуре: $pV = \text{const}$), энергетическая величина пропорциональна квадрату силовой

$$P \propto I^2 \text{ или } P \propto \varepsilon^2$$

(так, для мощности электрического тока $P = U^2/R$ или $P = I^2 R$). Тогда в общем виде можно записать

$$P = cF^2,$$

где F — силовая величина; c — некоторая постоянная. Отсюда

$$\lg P = 2 \lg F + \text{const.}$$

Для двух значений величин

$$\lg(P_2/P_1) = 2 \lg(F_2/F_1).$$

Учитывая введенное определение бела

$$1\text{Б} = \lg(P_2/P_1) \text{ при } P_2 = 10 P_1$$

и приравнивая (для наглядности) начальные уровни как P_1 , так и соответствующей силовой величины F_1 к единице, получим

$$1\text{Б} = \lg(10/1) = 2 \lg(F_2/1) \text{ или } \lg 10 = 2 \lg F_2.$$

Следовательно, одному белу при $F_1 = 1$ должно соответствовать $F_2 = \sqrt{10}$. В случае произвольной пары числовых значений F

$$1\text{Б} = 2 \lg(F_2/F_1) \text{ при } F_2/F_1 = \sqrt{10}.$$

Пример. Усиление мощности в 1000 раз равно $\lg(1000/1) = 3\text{Б}$, в то время как аналогичное усиление по напряжению или току составляет $2 \lg(1000/1) = 6\text{Б}$.

Логарифмическую единицу непер получают из отношения силовых, а не энергетических величин

$$1\text{Нп} = \ln(F_2/F_1) \text{ при } F_2/F_1 = e.$$

где e — основание натурального логарифма.

Переход к энергетическим величинам P можно выполнить тем же способом:

$$1\text{Нп} = 0,5 \ln(P_2/P_1) \text{ при } P_2/P_1 = e^2.$$

Так как для 1 Нп отношение $P_2/P_1 = e^2$, взяв десятичный логарифм этой дроби, получим выражение непера в белах: $1\text{Нп} = 0,8686\text{ Б}$.

Следует иметь в виду, что иногда, например в акустике, непер определяют на основе энергетических величин, т. е.

$$1\text{Нп} = \ln(P_2/P_1) \text{ при } P_2/P_1 = e.$$

Для такого «акустического» непера пересчетный коэффициент к белам будет вдвое меньшим:

$$1\text{Нп} = \lg e = 0,4343\text{ Б}.$$

Децибел определяется как единица в 10 раз меньшая, чем бел. Таким образом, применительно к двум заданным уровням P или F числовое значение логарифмической величины в децибелах, как для энергетических, так и для силовых величин, будет в 10 раз больше, чем в белах.

В акустике под децибелом понимают логарифмическую единицу, отсчитываемую не от произвольного, а от определенного уровня величины, например звуковой мощности или звукового давления.

Логарифмические единицы октава и декада в отличие от бела и непера относятся не к энергетическим или силовым характеристикам, а к частотным. Поэтому какая-либо двойственность понятий не возникает. Так как октава устанавливается с помощью логарифма при основании два, то для одной октавы отношение верхней (граничной) частоты к нижней равно не 10 и не $\sqrt{10}$, а двум.

Определение декады математически совпадает с определением бела для энергетических величин.

Логарифмическая единица фон, применяемая только в акустике, характеризует громкость звуков с учетом их физиологического восприятия. Для звука стандартного чистого тона частотой 1000 Гц уровень громкости в фонах совпадает с уровнем звукового давления в децибелах.

Внесистемные единицы могут образовывать сочетания с единицами СИ, например: ватт-час (Вт·ч), бек-

керель на литр (Бк/л), градус (угловой) в секунду (...°/с), вольт-ампер-секунда (В·А·с), электрон-вольт на моль (эВ/моль), килограмм на атомную единицу массы (кг/а.е.м.). Однако это недопустимо для единиц:

не имеющих установленных обозначений (неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.);

имеющих знаковые обозначения (градус Цельсия, градус, минута и секунда плоского угла, процент и промилле), если знаковое обозначение входит в произведение или знаменатель отношения;

относительных и логарифмических (миллионная доля, бел, децибел, октава, декада и фон), а также для диоптрии и атомной единицы массы, если они входят в произведение.

Десятичные кратные и дольные внесистемных единиц допустимы только применительно к единицам тонна, литр, электрон-вольт, вольт-ампер и вар (и их сочетаний с единицами СИ), но в тех случаях, когда они нашли широкое распространение, например мегатонна (Мт), миллилитр (мл), микропаскаль-литр (мкПа·л), мегаэлектрон-вольт (МэВ), но не миллитонна или мегалитр.

Принцип сочетаний внесистемных единиц, приведенных в табл. 4 и 5, например вольт-ампер-час (В·А·ч), стандартом не оговаривается.

Таблица 7. Внесистемные единицы, временно допускаемые к применению в электронной технике

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		Соотношение с единицей СИ
		международное	русское	
Масса	карат	—	кар	$2 \cdot 10^{-4}$ кг (точно)
Частота вращения	оборот в секунду	—	об/с	1 с^{-1}
	оборот в минуту	—	об/мин	$0,016(6) \text{ с}^{-1}$
Давление	бар	бар	бар	10^5 Па
Натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную	непер	Нр	Нп	0,8686 Б

Внесистемные единицы, временно допускаемые к применению в электронной технике и подлежащие изъятию в сроки, которые будут установлены дополнительно, приведены в табл. 7.

Из числа сочетаний единиц, временно допускаемых к применению в электронике, с единицами СИ и другими внесистемными единицами можно использовать лишь те, которые действительно распространены на практике, например литр-бар (л·бар). Для одной из них — бара — временно допускаются десятичные кратные и дольные (например, мегабар и микробар).

Единицы, ранее использовавшиеся в электронной технике и запрещенные к применению, даны в табл. 8.

Таблица 8. Единицы, запрещенные к применению

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		Соотношение с единицей СИ
		международное	русское	
Длина	ангстрем	Å	Å	10^{-10} м (точно)
	икс-единица	X	икс-ед.	$1,00206 \times 10^{-13}$ м
Масса	центнер	q	ц	100 кг (точно)
Телесный угол	квадратный градус	□°	□°	$3,0462 \times 10^{-4}$ ср
Площадь	барн	b	б	10^{-28} м ² (точно)
Сила, вес	тонна-сила	tf	тс	9806,65 Н (точно)
	килограмм-сила	kgf	кгс	9,80665 Н (точно)
	грамм-сила	gf	гс	$9,80665 \times 10^{-3}$ Н (точно)
Давление	дина	dyn	дин	10^{-5} Н
	килограмм-сила на квадратный сантиметр	kgf/cm ²	кгс/см ²	98066,5 Па (точно)
	миллиметр ртутного столба (торр)	mm Hg (Torr)	мм рт. ст. (тор)	133,322 Па
	миллиметр водяного столба	mm H ₂ O	мм вод. ст.	9,80665 Па
Напряжение механическое	килограмм-сила на квадратный миллиметр	kgf/mm ²	кгс/мм ²	$9,80665 \times 10^6$ Па (точно)

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		Соотношение с единицей СИ
		между- народное	русское	
Работа, энергия	эрг	erg	эрг	10^{-7} Дж
Мощность	лошадиная си- ла	—	л. с.	735,499 Вт
Динамическая вяз- кость	пуаз	P	П	0,1 Па·с
Кинематическая вязкость	стокс	St	Ст	10^{-4} м ² /с
Удельное электри- ческое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Ом·мм ² /м	10^{-6} Ом·м
Магнитодвижущая сила, разность маг- нитных потенциа- лов	гильберт	Gb	Гб	0,795775 А
Магнитный поток	максвелл	Mx	Мкс	10^{-8} Вб
Магнитная индук- ция	гаусс	Gs	Гс	10^{-4} Тл
Напряженность магнитного поля	эрстед	e	Э	79,5775 А/м
Количество тепло- ты, термодинами- ческий потенциал (внутренняя энер- гия, энтальпия, изохорно-изотер- мический потенци- ал), теплота фазо- вого превращения, теплота химиче- ской реакции	калория (межд.)	cal	кал	4,1868 Дж (точно)
Поглощенная до- за излучения	калория 15-гра- дусная	cal ₁₅	кал ₁₅	4,1855 Дж
Эквивалентная до- за излучения, по- казатель эквива- лентной дозы	калория термо- химическая	cal _{th}	кал _{th}	4,1840 Дж
Экспозиционная доза фотонного из- лучения (экспози- ционная доза гам- ма- и рентгенов- ского излучений)	рад	rad, rd	рад	0,01 Гр
Активность нукли- да в радиоактив- ном источнике	бэр	rem	бэр	0,01 Зв
	рентген	R	Р	$2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно)
	кюри	Ci	Ки	$3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (точно)

§ 4. Наименование единиц физических величин

Все единицы физических величин имеют наименования, которые пишутся полностью, прямым шрифтом, со строчной буквы, без кавычек или каких-либо других знаков.

Правильно:

Сила света, выраженная в канделах...

Неправильно:

Сила света, выраженная в «канделах»...

Простые наименования не включают дефис, предлоги «на», «в» или прилагательные «квадратный» и «кубический». В стандарте зафиксировано (без учета десятичных приставок) 65 простых наименований (например, метр, радиан, фарад, час, промилле, бар и др.), 6 из которых содержат более одного слова (например, градус Цельсия, атомная единица массы, миллионная доля и др.). В связи с унификацией единиц и введением ряда новых простых наименований надлежит руководствоваться следующими правилами (Л.8).

Наименования, являющиеся существительными мужского рода и оканчивающиеся согласной, при сочетании с количественным числительным (числовое значение) изменяются, как показано ниже.

I	I ¹ / ₂ , 2, 3, 4	5, 6, ⁵ / ₇ , и т. д.
ампер	ампера	ампер
кельвин	кельвина	кельвин
стерадиан	стерадиана	стерадиан
ньютон	ньютон	ньютон
кулон	кулона	кулон
ом	ома	ом
фарад	фарада	фарад
люкс	люкса	люкс
вар	вара	вар

Наименования метр и килограмм (грамм) в этом случае имеют окончания -а и -ов (например, два килограмма, пять килограммов). Такие же окончания имеют наименования градус Цельсия и градус плоского угла, час, литр, век, процент, оборот.

Наименования, являющиеся существительными мужского рода с окончанием на мягкий знак, а также жен-

ского рода с окончанием на -а, изменяются, как показано ниже.

1	1 ^{1/2} , 2, 3, 4	5, 6, 7 и т. д.
моль беккерель кандела декада	моля беккереля канделы декады	молей беккерелей кандел декад

Шесть простых наименований, приведенных ниже, изменяются следующим образом.

1	1 ^{1/2} , 2, 3, 4	5, 6, 7 и т. д.
генри тесла грэй промилле доля диоптрия	генри теслы грэя промилле доли диоптрии	генрия тесл грэй промилле долей диоптрий

Составные наименования образуются с помощью дефиса, предлогов «на», «в» и прилагательных квадратный и кубический (например, ньютон-секунда, джоуль на моль-кельвин, килограмм в минуту, квадратный метр).

При образовании составных наименований следует учитывать, что операции возведения в степень и перемножения недопустимы для приводимых ниже пяти групп единиц:

простое, наименование которых состоит более чем из одного слова (атомная единица массы, миллионная доля);

относительных и логарифмических (процент, промилле, бел, децибел, октава, декада, фон, непер);

имеющих знаковые обозначения (градус Цельсия, градус, минута и секунда плоского угла);

без установленного ГОСТ 8.417—81 обозначения (неделя, месяц, год, век, тысячелетие);

без установленного международного обозначения (диоптрия, карат, оборот в секунду, оборот в минуту).

При степенных преобразованиях составное наименование получают добавлением слов, определяющих данную операцию (например, кельвин в четвертой степени,

вольт в степени три вторых, минута в минус первой степени). Для положительных второй и третьей степеней равнозначны выражения «в квадрате» и «в кубе» (например, ампер во второй степени и ампер в квадрате).

В наименованиях единиц площади и объема допустимо использовать прилагательные «квадратный» и «кубический». Эти же прилагательные применяют, когда единицы площади или объема входят в производную единицу, например килограмм на кубический метр (плотность). В остальных случаях прилагательные не применяют: метр в третьей степени (момент сопротивления плоской фигуры), метр в квадрате на секунду (коэффициент диффузии).

Показатель степени всегда относится только к наименованию, т. е. физическому смыслу единицы, а не к числовому значению производной величины. Так, три метра в кубе — объем, равный трем, а не двадцати семи кубическим метрам.

Выражения типа градус Цельсия, децибел, секунда (плоского угла), год, диоптрия, вольт-ампер в какой-либо степени неприемлемы.

В изменении степенных наименований по числам и падежам участвует только название единицы и принадлежащее ей, если оно имеется, прилагательное «квадратный» и «кубический» (например, два вольта в степени три вторых, пять ньютон в квадрате, шести квадратным метрам).

Составное наименование произведений единиц, как СИ, так и внесистемных, образуют с помощью дефиса (например, килограмм-метр, вольт-ампер-секунда, паскаль-литр). Это правило нельзя применять к пяти группам внесистемных единиц, перечисленных выше.

Разрешается:

ампер-час
тонна-метр

Не допускается:

градус Цельсия-моль
минута (угловая)-метр

Наименования типа килограммометр или ньютонometr недопустимы.

В произведении любого числа единиц изменяются количественное числительное, последнее наименование и прилагательное к нему (пять ньютон-метров, пяти вольт-ампер-секундам, пятью ампер-квадратными метрами).

Составные наименования отношений образуют с помощью предлога «на», который ставит в винительный падеж единственного числа наименования всех единиц, входящих в знаменатель (ампер на килограмм, ньютон на кубический метр, радиан-секунда на теслу, литр на минуту-квадратный метр).

Если производная единица характеризует реальное течение процесса во времени и числителем в ней является только единица времени и только в первой степени, предлог «на» принято заменять предлогом «в», например: метр в секунду (линейная скорость), кельвин в минуту (скорость нагрева), тонна в час (массовый расход). Такая замена невозможна, если:

физическая величина не имеет отношения к временному ходу процесса, например: метр во второй степени на секунду (кинематическая вязкость);

знаменатель является степенным или составным, например: метр на секунду в квадрате, метр в квадрате на вольт-секунду, джоуль на секунду-квадратный метр. Для потока массы, энергии, объема, приходящегося на единицу площади, иногда используют знаменатель с двумя предлогами (например, килограмм в секунду на квадратный метр), к чему прибегать не следует.

Склоняемой частью любых отношений является только последнее наименование числителя (и прилагательное к нему), например: пять сименс на кельвин, пяти килограммам в третьей степени на секунду, пятью квадратными метрами в час. Это правило сохраняется во всех случаях, например:

«удельная постоянная вращения плоскости поляризации составляет пять радиан-метров в квадрате на килограмм»;

«акустическое сопротивление равняется пяти ньютон-секундам на метр в пятой степени»;

«коэффициент лучеиспускания ограничивается пятью ваттами на квадратный метр-кельвин в четвертой степени»;

«скорость изменения магнитного момента электрического тока достигает максимума при пяти ампер-квадратных метрах в секунду».

Наименования единиц могут применяться как самостоятельно, так и после словарных или цифровых записей числовых значений величин (например, длина в метрах, три метра, 8 метров). Однако, если наимено-

вание единицы совпадает с ее обозначением (моль, фон, вар, бар), использовать наименование после цифры (2 моля, 5 баров) не рекомендуется.

§ 5. Обозначение единиц физических величин

Краткой формой наименования единицы физической величины является ее обозначение. Всем простым наименованиям, кроме наименований пяти внесистемных единиц времени (неделя, месяц, год, век, тысячелетие), присвоены ГОСТ 8.417—81 обозначения. Правила написания и применения обозначений единиц сводятся к следующему.

Обозначения единиц могут быть буквенными и знаковыми ($^{\circ}\text{C}$, ... $^{\circ}$, ... $'$, ... $''$, %, ‰). Стандартом устанавливается два вида буквенных обозначений: международные (с использованием букв латинского или греческого алфавита) и русские. Международные обозначения единиц следует обязательно применять при указании значений величин на щитках или шкалах, помещаемых на изделиях. В остальных случаях допускается применять либо международные, либо русские обозначения. Одновременное применение обоих видов обозначений не допускается.

Обозначения озвучиваются только как наименования. Так запись 3,5 Φ есть три с половиной фарада, а не три с половиной эф.

Буквенные обозначения печатают прямым строчным шрифтом (кг, моль, лк, вар). Для 20 единиц, названных по имени ученых, первая буква является прописной (заглавной), например А (ампер), К (кельвин), Бк (беккерель), Б (бел). В двух случаях (эВ, дБ) прописной является вторая буква. (Следует отметить, что ранее обозначения единиц, кроме $^{\circ}\text{K}$ и $^{\circ}\text{C}$, набирались строчным курсивом: *кг, моль, а, ом.*) В последующие годы некоторые обозначения неоднократно изменялись. Поэтому нужно помнить, что:

Правильно:

К
 $^{\circ}\text{C}$
кд

Неправильно:

$^{\circ}\text{K}$, *град*
 $^{\circ}\text{Ц}$
св

Правильно:

рад
ср
Кл
Ом
См
Гн
Тл
Бк
Гр
а. е.
пк
дптр
В·А

Неправильно:

Р
стер, стр
к, кул
ом, Ω (в русских текстах)
обр. ом, *сим*
Г
Т
расп./с
Гй
а. е. д.
пс
Д
ва

Так как стандарт не устанавливает обозначения пяти внесистемных единиц времени, рекомендуется применять их полное наименование (например, период полураспада радия-226 составляет 1622 года).

В обозначениях единиц точка как знак сокращения не ставится. Следовательно, нельзя прибегать к записям кв. м, куб. м, г., гг., в. Для русских обозначений трех внесистемных единиц (а.е., св. год и а.е.м.) стандартом введено исключение.

В отличие от наименований единиц их обозначения не изменяются по числам и падежам: 1,5 м, 2 моль, 3 Ом, 4 бар и т. п. Однако при чтении записей обозначения подобно цифрам переходят в наименования: полтора метра, два моля, три ома, четыре бара. Наиболее четко это выступает в обозначениях производных единиц, например 3 моль/м³ (три моля на кубический метр) или 4 бар/с (четыре бара в секунду). Неправильно: 3 моля/м³ или 4 бара/с.

Обозначения единиц применяют только после числовых значений величин (например, звуковое давление $2 \cdot 10^{-3}$ Па). Неправильно: давление выражается в Па, следует: ...выражается в паскалях. Стандарт допускает две дополнительные возможности применения обозначений.

1. В заголовках граф и наименований строк (боковиках) таблиц, например:

Параметр	Режимы тренировки при температуре, °С		
	60		150
Предельно допустимое обратное напряжение, В	600	800	300
Напряжение тренировки, В	800	1000	200
Ток, мА, не более	2	1,6	5

2. Для пояснения физических величин в формулах. Однако при этом нельзя располагать обозначение единицы в одну строку с формулой, которая включает символы величин.

Правильно:

$$t = 2\pi m / (eB),$$

где t — время прохода витка спирали, с; m — масса электрона, кг; e — заряд электрона, Кл; B — магнитная индукция, Тл.

Неправильно:

$$t = 2\pi m / (eB), \text{ с,}$$

где m — масса электрона, кг; e — заряд электрона, Кл; B — магнитная индукция, Тл.

Обозначение единицы должно быть в одной строке с числовым значением величины, переносить его в следующую строку не допускается. Между последней цифрой числа и обозначением единицы нужно оставлять пробел (например, 100 Вт, 80 %, 20°С, но не 100Вт, 80%, 20°С). Исключения составляют лишь три знаковых обозначения плоского угла (...°, ...', ..."), где такой пробел не делают (например, 20°5'30", но не 20° 5' 30"). Если числовое значение величины представлено десятичной дробью, обозначение единицы следует помещать после всех цифр.

Правильно:

5,75° или 5°45'28,8"

Неправильно:

5°,75 или 5°45'28",8

При указании значений величин с предельными отклонениями следует заключать числовые значения с предельными отклонениями в скобки, а обозначение единицы помещать после них или проставлять обозначения единиц после числового значения величины и после ее предельного отклонения.

Правильно:

$(100,0 \pm 0,1)$ кг
 $5 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$

Неправильно:

$100,0 \pm 0,1$ кг
 5 ± 1 кг

Кроме того, к обозначениям единиц нельзя добавлять буквы или слова, указывающие на физическую величину, например, нм^3 (нормальный кубический метр), % объемн. (объемный процент). В этих случаях определяющие слова следует присоединять к наименованию величины, а единицу обозначать в соответствии со стандартом (например, объем газа, приведенный к нормальным условиям, равен 100 м^3 ; объемная доля 2 %).

Это правило можно дополнить следующей рекомендацией (Л.4). Если в тексте приводится ряд (группа) числовых значений, выраженных одной и той же единицей физической величины, эту единицу указывают после последней цифры (например, 2, 3, 4 А; $10 \times 10 \times 50$ мм; 4,5; 7,5; 10,0; 12,0 мм). Аналогично поступают при указании интервала числовых значений (например, от 0,5 до 2,0 мм; 350—500 кг).

В степенных обозначениях показатель степени представляют с цифрой: К^4 , $\text{В}^{3/4}$, мин^{-1} . Использование знака извлечения корня, например $\sqrt{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}}$, допускается только в метрологических формулах. Возведению в степень не подлежат следующие четыре группы обозначений:

- 1) простых наименований, включающих более одного слова ($^{\circ}\text{С}$, а.е.м., млн^{-1});
- 2) относительных и логарифмических единиц (% , ‰, Б, дБ, окт, дек, фон, Нп);
- 3) знаковых (\dots° , \dots' , \dots'');
- 4) не имеющих установленного международного эквивалента (например, дптр, кар, об/с, об/мин).

Следовательно, недопустимы записи $^{\circ}\text{С}^2$, а.е.м.³, дптр^{1/2} или $(\text{об/с})^{-1}$. Если необходимо, вначале соответствующие единицы переводят в единицы СИ (например, в кельвины, килограммы, радианы) или разрешенные внесистемные.

Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии, как знаками умножения.

Правильно:

Н·м
В·А·с
А·м²

Неправильно:

Нм
ВАс
Ам²

В машинописных текстах допускается точку не поднимать (Н.м). Не рекомендуется, хотя это и разрешено стандартом, использовать вместо точки пробел.

Лучше:

Н·м
кг·с

Не рекомендуется:

Н м
кг с

Обозначения указанных выше четырех групп не подлежат перемножению, т. е. неправильно: °С·моль или .../·м.

Кроме того, рекомендуется придерживаться следующих правил.

Обозначения основных и дополнительных единиц, начинающиеся со строчной буквы и не возведенные в степень, располагают в том же порядке, в каком они следуют друг за другом в табл. 1 и 2.

Лучше:

кг·с
кд·ср

Не рекомендуется:

с·кг
ср·кд

Этим же правилом руководствуются при взаимном расположении таких обозначений единиц СИ, как ампер (А) и 18 производных, которые были приведены в табл. 3.

Лучше:

А·Вб
Кл·Ом

Не рекомендуется:

Вб·А
Ом·Кл

В сочетаниях с другими единицами обозначение ампера и любой из упомянутых 18 производных единиц ставят на первое место.

Лучше:

А·с
Ом·м
Па·л
лк·с

Не рекомендуется:

с·А
м·Ом
л·Па
с·лк

Обозначение метра (м) или секунды (с) не следует ставить впереди какого-либо другого обозначения, если оно не возведено в степень.

Лучше:	Не рекомендуется:
кг·м	м·кг
рад·с	с·рад
т·м	м·т

Обозначения со степенью располагают вслед за дугими.

Лучше:	Не рекомендуется:
с·м ²	м ² ·с
с·ср·м ³	с·м ³ ·ср

Обозначение кельвина (К) всегда ставят последним.

Лучше:	Не рекомендуется:
моль·К	К·моль
м ⁻² ·К ⁻⁴	К ⁻⁴ ·м ⁻²

Эти рекомендации направлены на то, чтобы записи типа Па·с (динамическая вязкость), Ом·м (удельное электрическое сопротивление) или моль·К (частое сочетание единиц) нельзя было принять за сантипаскаль (сПа), миллиом (мОм) или киломоль (кмоль).

В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления должна применяться одна косая или горизонтальная черта. Допускаются также обозначения единиц в виде произведения обозначений, возведенных в положительные или отрицательные степени. Однако, если хотя бы одна из единиц записана с помощью отрицательной степени, применять косую или горизонтальную черту нельзя.

Правильно:	Неправильно:
$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ или $\text{Вт}/\text{м}^2/\text{К}$
$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$	$\frac{\text{К}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}/\text{К}}$

При использовании косой черты обозначения в числителе и знаменателе следует помещать в строку; произведение обозначений единиц в знаменателе заключают в скобки.

Правильно:

м/с

Дж/(моль·К)

Неправильно:

м/с

Дж/моль·К

Эти ранее не существовавшие ограничения устраняют неопределенность в содержании знаменателя (или в том, что является последним множителем). Все разрешенные способы записи отношений равноправны.

Как упоминалось, отношения могут образовывать любые единицы (кроме тех внесистемных единиц времени, для которых отсутствуют установленные обозначения). Поэтому записи типа Кл/а.е.м. или дБ/м правомерны. В отличие от прежнего допускаются сочетания буквенных и знаковых обозначений, например, °С/м (градиент температуры) или ..."/с (угловая скорость). Знаки не должны входить в знаменатель. Нельзя одновременно применять обозначения и наименования единиц. Запись должна быть однородной.

Правильно:

5 К/м

5 кельвин на метр

100 тонн в год

Неправильно:

5 К/метр

5 К на метр

100 т/год

100 т/г.

Нельзя также вводить в обозначения единиц посторонние слова (в полном или сокращенном виде) и не предусмотренные стандартом символы.

Правильно:

$\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$

Неправильно:

альфа-частиц

$\text{с} \cdot \text{м}^2$

нейтр.

$\text{с} \cdot \text{м}^2$

3 (с · м²)

§ 6. Десятичные кратные и дольные единицы. Приставки

Для образования десятичных кратных и дольных унифицированных единиц физических величин используют в пределах от 10^{18} до 10^{-18} набор установленных стандартом степенных множителей (табл. 9). Каждый множитель имеет наименование и сокращенное буквен-

ное обозначение — приставки соответственно к наименованию и обозначению единицы. Шрифты обозначений единицы и приставки должны быть одинаковы.

Таблица 9. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	Е	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санти	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

Правила образования десятичных кратных и дольных единиц состоят в том, что десятичную единицу получают путем умножения исходной на какой-либо множитель, из указанных в табл. 9. Полученная таким образом единица приобретает новое наименование и новое обозначение. Так, при умножении исходной единицы метр (м) на множитель 10^{-9} получается новая единица нанометр (нм). При этом недопустимы такие произвольные термины, как микрон, мсгом. Полученную единицу следует рассматривать как самостоятельную, хотя и некогерентную, в отношении которой действуют те же правила, что и для единиц СИ.

Приставки могут применяться со всеми единицами СИ, а также со следующими внесистемными единицами, используемыми в электронике: т, л, эВ, В·А, вар, бар. Однако следует применять лишь те внесистемные кратные и дольные единицы, которые нашли широкое распространение (например, мл, ГэВ, кВ·А, мкбар). С приставками не сочетаются:

внесистемные единицы времени (мин, ч, сут и др.);

внесистемные единицы, которые не могут входить в произведения ($^{\circ}\text{C}$, ... $^{\circ}$, ...', ...'', %, ‰, млн $^{-1}$, Б, дБ, окт, дек, фон, Нп, дптр, а.е.м., кар, об/с, об/мин). Отметим, что децибел (дБ) и бел (Б), несмотря на кратность,

следует считать двумя разными единицами, от которых десятичные не образуют.

Присоединение к единице двух или более приставок подряд не допускается.

Правильно:

пикофарад
пФ

Неправильно:

микромикрофарад
мкмкФ

Основой образования кратных и дольных единиц массы служит грамм (0,001 кг), а не килограмм, где приставка уже имеется (что сложилось исторически). Таким образом получают, например, миллиграмм (мг), но не микрокилограмм (мккг).

Если исходная единица есть произведение или отношение других, приставку нужно присоединять к первой из них.

Правильно:

микроом-метр
мкОм·м
килоджоуль на моль
кДж/моль

Неправильно:

ом-микрометр
Ом·мкм
джоуль на миллимоль
Дж/ммоль

Допускается применять приставку во втором множителе произведения или в знаменателе лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены, например, тонна-километр (т·км) или ампер на квадратный миллиметр (А/мм²). Недопустимо, чтобы приставка была и в числителе, и в знаменателе. Так, желая сохранить прежние числовые значения механического напряжения в кгс/мм², нельзя образовывать близкую ей десятичную производную единицу деканьютон на квадратный миллиметр (даН/мм²). Основная единица СИ — килограмм — сочетается с любыми десятичными без ограничений (например, МДж/кг), но для дробей с двумя приставками «кило» целесообразны сокращения.

Лучше:

Дж/г
Дж/(моль·К)

Не рекомендуется:

кДж/кг
кДж/(кмоль·К)

Чтобы возвести кратную или дольную единицу в степень, скобки не нужны (например, кК⁴ — килокельвин в четвертой степени; мкВ^{3/2} — микровольт в степени три вторых; см² — квадратный сантиметр).

При образовании кратных и дольных от единиц, возведенных в степень, следует иметь в виду, что нельзя отождествлять приставку, присоединенную к наименованию единицы и являющуюся грамматической частью нового наименования, с множителем, которому она соответствует. Так, 5 км^2 соответствует $5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, но не пяти тысячам квадратных метров. Если нужно возвести в степень число, это требует особого указания: $(5 \text{ км})^2 = 25 \text{ км}^2$.

Принцип слитности приставки с исходной единицей и применение скобок определяют наилучший способ пересчета кратных и дольных производных в единицы СИ:

$$0,002 \text{ см}^{-1} = 0,002 \cdot (10^{-2} \text{ м})^{-1} = 0,2 \text{ м}^{-1};$$

$$7 \text{ т} \cdot \text{км} = 7 \cdot (10^3 \text{ кг}) \cdot (10^3 \text{ м}) = 7 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м};$$

$$240 \text{ см}^3/\text{мин} = 240 \cdot (10^{-2} \text{ м})^3 / (60 \text{ с}) = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выбор той или иной кратной (дольной) единицы выполняют на основе справочного приложения 3 ГОСТ 8.417—81 с учетом следующих рекомендаций.

Числовые значения величин должны быть удобны для практики и находиться преимущественно в диапазоне между 0,1 и 1000.

Лучше:

37 кА

0,2 мПа

Не рекомендуется:

37 000 А

0,0002 Па

Множители с показателем, кратным трем, рассматриваются как предпочтительные; следует избегать приставок гекто, дека, деци и санти. При вычислениях следует использовать только когерентные единицы СИ, а если необходимо, пересчитывать полученный результат в десятичные. В таблицах и при сопоставлениях целесообразно применять одну и ту же единицу.

ГЛАВА ВТОРАЯ. БАЗОВЫЕ ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

В электронной промышленности применяют разнообразные единицы физических величин. Производство и эксплуатация электронных приборов, интегральных схем и других изделий электронной техники основаны преимущественно на механических, термохимических, электрофизических (включая электро- и радиоизмерения) и светотехнических процессах, для которых ха-

рактены определенные физические величины и соответствующие им четыре группы единиц.

Так как каждый из этих процессов состоит из ряда технологических или контрольно-измерительных операций, рассмотрим соответствующие им конкретные единицы физических величин. Приведенные далее подборки единиц могут считаться базовыми. Если необходимо, на их основе легко построить другие, более сложные или специальные производные единицы. Для распространенных единиц прежних систем, в настоящее время запрещенных к применению, приводятся коэффициенты перевода в СИ. В отдельных случаях даны возможные округления.

Такое разделение является условным, упрощает освоение Международной системы единиц и соответствует информационному приложению к стандарту. Уравнения связи между величинами не даются (Л.2 и 9). Некоторое исключение делается для раздела электромагнетизма, где в процессе рационализации необходимо не только пересчитывать числовые значения величин, но и преобразовывать формулы. Одновременно это позволяет представить электрические и магнитные единицы в хорошо запоминающемся виде.

Символы (буквенные обозначения) величин в приводимых таблицах соответствуют рекомендациям, приводимым в литературе по метрологии (Л.7). В таблицах не приведены единицы, являющиеся десятичными кратными или дольными СИ (например, $1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$). Производные некоторых внесистемных единиц, например, дюйма (in, "..."), часа (ч) или градуса Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$), приводятся в отдельных случаях. Более полные материалы по этим единицам можно найти в специальных справочниках (Л.10—15,17).

Для устранения параллельных записей каждая единица вместе с рекомендуемыми кратными и дольными упоминается, как правило, один раз. Так, поскольку десятичные от метра (км, мм, мкм, нм, пм) приведены в первой (механической) группе единиц, нет необходимости рассматривать их вновь в группе светотехнических.

§ 7. Единицы физических величин, относящихся к механике

Для механозаготовительных операций производства изделий электронной техники характерны

силовые воздействия на твердые или сыпучие тела. К этим операциям относятся:

обработка материалов давлением (листовая штамповка — вытяжка, гибка, рихтование) и свободная ковка; объемная штамповка — выдавливание; прокатка, протяжка, волочение, намотка;

формование вязкотекучих материалов (литье и жидкая штамповка металлов); переработка керамических масс, стекла и пластмасс;

разделительная заготовка (нарезка, вырубка, пробивка);

станочные операции (координатно-расточные, группового сверления, долбежные, шлифовальные);

абразивная обработка хрупких главным образом полупроводниковых материалов (резка, скрайбирование, шлифовка, полировка, песко- и дробеструйная очистка поверхностей);

изготовление и обработка порошков (помол, сферодизация, разделение на фракции, прессование).

Для механосборочных операций характерно соединение деталей или различных конструктивных элементов (электронно-оптических и замедляющих систем, экранов) без термического воздействия:

армирование, запрессовка, свинчивание, клепка, штифтование, фальцовка, сшивка вырубкой, закатка, зажим, перевязывание;

холодная сварка;

получение прижимных контактов;

сборка внешней арматуры (соленоиды, полюсные наконечники, цоколи).

Для откачных операций, цель которых состоит в том, чтобы обеспечить вакуум, необходимый для работы электронных приборов, характерно изменение механической величины — давления газа.

При прочностных испытаниях готовую продукцию подвергают воздействию ударов, вибрации и центробежных сил.

Соответствующие этим операциям физические величины вытекают из простых геометрических и механических понятий и связаны с линейно-угловыми измерениями, установлением скоростей, частот, силы, расхода вещества или энергии. Для этих физических величин используют единицы длины, массы, времени, плоского и

телесного углов, а также производные от них единицы пространства, силы, давления, энергии, мощности и др.

Первые пять единиц принадлежат к основным и дополнительным единицам СИ (см. табл. 1 и 2). Рекомендуемые для применения их десятичные кратные и дольные приведены в табл. 10.

Таблица 10. Кратные и дольные основных и дополнительных единиц СИ

Величина		Обозначение	
наименование	символ	единица СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Длина	l	м	км, мм, мкм, нм, пм
Масса	m	кг	Мг, г, мг, мкг
Время	t	с	кс, мс, мкс, нс
Плоский угол	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi,$	рад	мрад, мкрад
Телесный угол	ω, Ω	ср	—

Кроме того, можно использовать без ограничений единицы времени — минуту (мин), час (ч), сутки (сут) и плоского угла — градус (...°), минуту (...') и секунду (...").

Отметим, что не рекомендуется применять дольную единицу длины — сантиметр. В конструкторской документации следует использовать миллиметры, а при составлении планировок — метры или километры.

Коэффициенты для перевода в СИ некоторых еще используемых в электронной технике внесистемных единиц длины и массы приведены в табл. 11 и 12, а соотношения между секундой и разрешенными к применению

Таблица 11. Перевод в СИ внесистемных единиц длины

Единица		Выражение через единицу СИ — метр (м)
наименование	обозначение	
Дюйм	in, ..."	$2,54 \cdot 10^{-2}$ (точно)
Мил	mil	$2,54 \cdot 10^{-5}$
Микрон	мкм, мк, μ	10^{-6}
Килоикс — единица	килоикс-ед., кХ	$1,002 \cdot 10^{-10}$
Ангстрем	А	10^{-10}
Икс — единица	икс-ед.	$1,002 \cdot 10^{-13}$
Ферми	Ф	10^{-15}

Таблица 12. Перевод в СИ внесистемных единиц массы

наименование	Единица		Выражение через единицу СИ — килограмм (кг)
	обозначение		
Тонна	т	1000	
Центнер	ц	100	
Техническая единица массы	т. е. м.	9,81	
Фунт	lb	0,454	
Гамма	γ	10 ⁻⁹	
Атомная единица массы	а. е. м.	1,66 · 10 ⁻²⁷	(приблизительно)

Таблица 13. Соотношения между единицами времени

Наименование единицы	Обозначение единицы						
	с	мин	ч	сут	неделя	месяц	год
Секунда	1						
Минута	60	0,016 (6)	2,7 (7) · 10 ⁻⁴	1,1574 · 10 ⁻⁵	1,6534 · 10 ⁻⁶	3,8027 · 10 ⁻⁷	3,1689 · 10 ⁻⁸
Час	3600	1	0,016 (6)	6,94 (4) · 10 ⁻⁴	9,9206 · 10 ⁻⁵	2,2816 · 10 ⁻⁵	1,9013 · 10 ⁻⁶
Сутки	86400	60	1	0,0416 (6)	5,9523 · 10 ⁻³	1,3690 · 10 ⁻³	1,1408 · 10 ⁻⁴
Неделя	604800	1440	24	1	0,14286	3,2855 · 10 ⁻²	2,7379 · 10 ⁻³
Месяц	2,6297 · 10 ⁶	43829	168	7	1	0,22998	1,9165 · 10 ⁻²
Год	3,1557 · 10 ⁷	5,2595 · 10 ⁵	730,48	30,437	4,3481	12	0,083 (3)
			8765,8	365,24	55,177		1

нию внесистемными единицами времени — в табл. 13. Данные, приведенные в табл. 14 и 15, повышают наглядность угловых преобразований.

Таблица 14. Меры плоского угла

Угол	В радианах	В градусах	В минутах
2π	6,283	360	—
	6	343,8	—
	5	286,5	—
	4	229,2	—
π	3,141	180	—
	3	171,9	—
	2	114,6	—
π/2	1,5708	90	—
π/3	1,047	60	—
	1	57,296	—
	0,9	51,57	—
	0,8	45,84	—
π/4	0,7854	45	—
	0,7	40,11	—
π/6	0,5236	30	—
π/12	0,2618	15	—
	0,25	14,32	—
π/18	0,1745	10	600
π/36	0,08726	5	300
π/180	0,01745	1	60
	$1,454 \cdot 10^{-2}$	—	50
	$1,164 \cdot 10^{-2}$	—	40
π/360	$0,8726 \cdot 10^{-2}$	0,5	30
	$0,7272 \cdot 10^{-2}$	—	25
	$0,5818 \cdot 10^{-2}$	—	20
	$0,2909 \cdot 10^{-2}$	—	10
π/10800	$2,909 \cdot 10^{-4}$	—	1

Таблица 15. Связь телесного угла Ω (в стерadianах) и плоского угла α раствора конуса (в градусах)

Ω	α	Примечания
4π	360°	Полный телесный угол
2π	180°	—
π	120°	—
1,84030	90°	—
$\pi/2$	$82^\circ 49' 9,26''$	Прямой телесный угол
1	$65^\circ 32' 27,8''$	—
0,75	$56^\circ 33' 43,8''$	—
0,5	$46^\circ 1' 26,8''$	—
0,25	$32^\circ 26' 1,8''$	—
0,1	$20^\circ 28' 18,2''$	—
0,05	$14^\circ 27' 57,7''$	—
0,01	$6^\circ 27' 57,3''$	—
0,005	$4^\circ 34' 18''$	—
$3,046 \cdot 10^{-4}$	$1^\circ 7' 38,7''$	Квадратный градус (... \square°)

Важнейшие кратные и дольные производных единиц СИ, относящихся к понятиям пространства, периодических явлений и механики, приведены в табл. 16.

Таблица 16. Кратные и дольные производных единиц СИ, относящихся к понятиям пространства, периодических явлений и механики

Величина		Обозначения	
наименование	символ	единиц СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Площадь	A	m^2	km^2, dm^2, mm^2
Объем, вместимость	V	m^3	dm^3, mm^3
Скорость (линейная)	v	m/c	mm/c
Ускорение	a	m/c^2	—
Частота периодического процесса	ν	Гц	ТГц, ГГц, МГц, кГц
Частота вращения	n	c^{-1}	—
Линейная плотность	—	kg/m	mg/m
Поверхностная плотность	—	kg/m^2	g/m^2
Плотность (плотность массы)	ρ	kg/m^3	$Mg/m^3, kg/dm^3$
Сила, вес	F, G	N	MN, kN, mN, mN
Момент силы	T	$N \cdot m$	$MN \cdot m, kN \cdot m, mN \cdot m, mN \cdot m$
Давление	p	Па	ГПа, МПа, кПа, мПа, мкПа
Напряжение	σ	Па	ГПа, МПа, кПа

Величина		Обозначения	
наименование	символ	единиц СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Градиент скорости	$\text{grad } v$	с^{-1}	—
Динамическая вязкость	η	$\text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{мПа} \cdot \text{с}$
Кинематическая вязкость	ν	$\text{м}^2/\text{с}$	$\text{мм}^2/\text{с}$
Поверхностное натяжение	γ	$\text{Н}/\text{м}$	$\text{мН}/\text{м}$
Массовый расход	Q_m	$\text{кг}/\text{с}$	—
Объемный расход, объемная скорость	Q_V	$\text{м}^3/\text{с}$	$\text{мм}^3/\text{с}$
Объемный расход через площадь поперечного сечения	—	$\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	—

Кроме того, можно использовать следующие внесистемные производные.

Наименование величины	Обозначение единицы
Объем, вместимость	л, мл
Скорость	км/ч
Частота вращения	мин^{-1}
Плотность (плотность массы) .	кг/л, г/мл, г/л
Объемный расход	л/с
Объемный расход через площадь поперечного сечения . .	$\text{л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$

Перевод в СИ ранее применявшихся единиц может быть выполнен с помощью табл. 17—19.

Таблица 17. Перевод в СИ единиц, относящихся к понятиям пространства, периодических явлений и механики

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ
Площадь	квадратный дюйм	in^2	$6,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
	барн	б	10^{-28} м^2
Объем	литр	л	10^{-3} м^3
	кубический дюйм	in^3	$1,64 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
	лямбда	лмб	10^{-9} м^3
Скорость	километр в час	км/ч	0,278 м/с
Частота вращения	оборот в секунду	об/с	1 с^{-1}
	оборот в минуту	об/мин	$0,016(6) \text{ с}^{-1}$

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ
Плотность (плотность мас- сы)	килограмм-сила-се- кунда в квадрате на метр в четвертой сте- пени	кгс·с ² /м ⁴	9,81 кг/м ³
Момент силы	килограмм-сила-метр дина-сантиметр	кгс·м дин·см	9,81 Н·м 10 ⁻⁷ Н·м
Динамическая вязкость	килограмм-сила-час на метр в квадрате килограмм-сила-се- кунда на метр в ква- драте пуаз стокс	кгс·ч/м ² кгс·с/м ² П Ст	3,53·10 ⁴ Па·с 9,81 Па·с 0,1 Па·с 10 ⁻⁴ м ² /с
Кинематическая вязкость			
Поверхностное натяжение	дина на сантиметр	дин/см	10 ⁻³ Н/м

Таблица 18. Перевод в СИ единиц силы

Внесистемная единица		Выражение через единицу СИ — ньютон (Н)
наименование	обозначение	
Тонна-сила	тс	9,81·10 ³
Стен	сн	10 ³
Килограмм-сила	кгс	9,81
Фунт-сила	lbf	4,45
Паундаль	pdl	0,138
Дина	дин	10 ⁻⁵

Примечание. В большинстве случаев достаточно округле-
ние 1 кгс=10 Н, завышающее результат перевода на 1,94%.

Соотношения между применяемыми в электроваку-
умной технике единицами объемного расхода приведены
в табл. 20, а коэффициенты перевода в СИ единиц объ-
емного расхода через площадь поперечного сечения—
в табл. 21.

Таблица 19. Перевод в СИ единиц давления (механического напряжения)

Внесистемная единица			Выражение через единицу СИ — паскаль (Па)	
наименование	обозначение	определение	полное	для технических расчетов
Килограмм-сила на квадратный миллиметр	кгс/мм ²	—	9,80665 · 10 ⁶	10 ⁷
Атмосфера физическая	атм	760 мм рт. ст.	101325	} 10 ⁵
Бар	бар	10 ⁶ дин/см ²	10 ⁵	
Атмосфера техническая	ат	1 кгс/см ²	98066,5 (точно)	9,81 · 10 ³
Тонна-сила на квадратный метр	тс/м ²	—	—	10 ³
Пьеза	пз	1 см/м ²	133,322	133
Миллиметр ртутного столба (торр, тор)	мм рт. ст. (торр, тор)	—	—	—
Миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	1 кгс/м ²	9,80665	9,81
Калория на кубический метр	кал/м ³	—	4,1868 (точно)	4,19
Джоуль на кубический метр	Дж/м ³	—	1	1
Микрометр ртутного столба (миллиторр, миллитор)	мкм рт. ст. (мторр, мтор)	—	0,133322	} 0,1
Бар физический (бария)	бар	1 дин/см ²	0,1	

Примечания: 1. Бар (10⁶ дин/см², или 750,06 мм рт. ст.) — единица, широко использовавшаяся в американской литературе. Физический бар (1 дин/см²) встречался в отечественной литературе. Для отличия их иногда применяли соответственно наименования мегабар и микробар (или бария).

2. Техническая атмосфера равна 735,6 мм рт. ст.

3. Наименования и обозначения торр и тор даны: первое — в соответствии с ГОСТ 8.417—81, а второе — с рекомендациями Международного вакуумного общества.

4. Выражение давления через объемную плотность энергии (кал/м³, Дж/м³) не допускается.

Т а б л и ц а 20. Соотношения между единицами объемного расхода

Наименование единицы	Обозначение единицы						
	м³/с	л/с	л/мин	л/ч	мм³/с	мм³/мин	мм³/ч
Кубический метр в секунду	1	10³	—	—	10⁹	—	—
Кубический метр в минуту	1,67·10⁻²	16,7	10³	—	1,67·10⁷	—	—
Литр в секунду	10⁻³	1	60	—	10⁶	—	—
Кубический метр в час	2,78·10⁻⁴	0,278	16,7	10³	2,78·10⁵	—	—
Литр в минуту	1,67·10⁻⁵	1,67·10⁻²	1	60	1,67·10⁴	—	—
Кубический сантиметр в се- кунду	10⁻⁶	10⁻³	0,06	3,6	10³	—	—
Литр в час	2,78·10⁻⁷	2,78·10⁻⁴	1,67·10⁻²	1	278	—	—
Кубический сантиметр в ми- нуту	1,67·10⁻⁸	1,67·10⁻⁵	10⁻³	0,06	16,7	10³	—
Кубический миллиметр в се- кунду	10⁻⁹	10⁻⁶	—	3,6·10⁻³	1	60	—
Кубический сантиметр в час	2,78·10⁻¹⁰	2,78·10⁻⁷	—	10⁻³	0,278	16,7	—
Кубический миллиметр в ми- нуту	1,67·10⁻¹¹	1,67·10⁻⁸	—	—	1,67·10⁻²	1	60
Кубический миллиметр в час	2,78·10⁻¹³	2,78·10⁻¹⁰	—	—	2,78·10⁻⁴	1,67·10⁻²	1

Т а б л и ц а 21. Объемный расход через площадь поперечного сечения

наименование	Единица	обозначение	Выражение через единицу СИ и допускаемую к применению наравне с ней	
			м/с	л/(с·м³)
Литр на секунду-квадратный сантиметр		л/(с·см²)	10	10⁴
Кубический метр на час-квадратный сантиметр		м³/(ч·см²)	2,78	2780
Литр на минуту-квадратный сантиметр		л/(мин·см²)	0,167	167
Кубический сантиметр на секунду-квадратный сантиметр		см³/(с·см²)	10 ⁻²	10
Литр на час-квадратный сантиметр		л/(ч·см²)	2,78·10 ⁻³	2,78
Литр на секунду-квадратный метр		л/(с·м²)	10 ⁻³	1
Кубический сантиметр на минуту-квадратный сантиметр		см³/(мин·см²)	—	0,167
Кубический миллиметр на секунду-квадратный сантиметр		мм³/(с·см²)	—	10 ⁻²
Кубический сантиметр на час-квадратный сантиметр		см³/(ч·см²)	—	2,78·10 ⁻³
Кубический миллиметр на минуту-квадратный сантиметр		мм³/(мин·см²)	—	1,67·10 ⁻⁴

Кратные и дольные единиц энергии и мощности СИ приведены в табл. 22.

Таблица 22. Кратные и дольные единицы энергии и мощности СИ

Величина		Обозначение	
наименование	символ	единиц СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Энергия, работа	E, W	Дж	ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж
Теплота (количество теплоты)	Q		
Мощность	P	Вт	ГВт, МВт, кВт, мВт, кВт
Тепловой поток	Φ		
Активная электрическая мощность	P		
Звуковая мощность	P		
Плотность потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга)	\vec{S}	Вт/м ²	МВт/м ² , кВт/м ² , мВт/м ²
Поверхностная плотность теплового потока	\vec{q}		

Кроме того, допускается использовать внесистемную единицу энергии — электрон-вольт (эВ) и кратные ГэВ, МэВ, кэВ.

Перевод в СИ внесистемных единиц энергии может быть выполнен с помощью табл. 23.

Таблица 23. Перевод в СИ внесистемных единиц энергии

Единица		выраженные через единицу СИ — джоуль (Дж)
наименование	обозначение	
Лошадиная сила-час	л. с. ч	$2,65 \cdot 10^6$
Ватт-час	Вт · ч	$3,60 \cdot 10^3$
Британская тепловая единица	Btu	$1,06 \cdot 10^3$
Литр-атмосфера	л. атм	$1,01 \cdot 10^2$
Килограмм-сила-метр	кгс · м	9,81
Калория	кал	4,19
Фунт-сила-фут	lbf · ft	1,36
Паскаль-кубический метр	Па · м ³	1
Паскаль-литр	Па · л	10^{-3}
Эрг	эрг	10^{-7}
Электрон-вольт	эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$

Для разрешенного обратного перевода следует пользоваться соотношением

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 10^3 \text{ Па} \cdot \text{л} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ}.$$

Для перевода в СИ внесистемных единиц мощности можно пользоваться табл. 24.

Таблица 24. Перевод в СИ внесистемных единиц мощности

Единица		Выражение через единицу СИ — ватт (Вт)
наименование	обозначение	
Лошадиная сила	л. с.	736
Килограмм-сила-метр в секунду	кгс·м/с	9,81
Калория в секунду	кал/с	4,19
Килокалория в час	ккал/ч	1,16
Паскаль-кубический метр в секунду	Па·м³/с	1
Британская тепловая единица в час	Btu/h	0,293
Паскаль-литр в секунду	Па·л/с	10 ⁻³
Эрг в секунду	эрг/с	10 ⁻⁷

§ 8. Единицы физических величин, относящихся к термохимии

С нагревом (или охлаждением) в электронной промышленности связаны следующие операции:

сушка и отжиг для удаления влаги и загрязнений, стабилизации пластически- или упругодеформированных материалов, а также спекания порошков;

вакуумно-термическое обезгаживание;

создание неразъемных соединений и контактов — сварка металлов и диэлектриков (электроконтактная, дуговая, газовая, газозлектрическая, термокомпрессионная); пайка (активная, пассивная, термодиффузионная); вплавление невыпрямляющих электродов; склеивание, заливка, пропитка.

При этом определенные особенности имеют изготовление металлостеклянных и металлокерамических сплавов, а также герметизация осветительных, вакуумных и газоразрядных ламп, транзисторов и микросхем.

К технокимическим процессам можно отнести:

разделение гетерогенных или однородных смесей

(центрифугирование, выращивание монокристаллов, осаждение, ионный обмен, вакуумное выпаривание, использование газотранспортных реакций и др.);

очистку различных поверхностей в органических растворителях, поверхностно-активными веществами и в агрессивных средах, а также промывку;

нанесение порошковых или пленочных покрытий — проводящих (металлизация), полупроводниковых, изоляционных, влагозащитных, антикоррозионных, а также специальных (например, эмиссионных или антиэмиссионных, люминесцентных, геттерных). Эти операции выполняют седиментацией из суспензий и взвесей (намазка, облив, окунание, пульверизация, центрифугирование, трафаретная печать), вакуумно-термическим и плазменно-дуговым напылением, горячей металлизацией и накаткой;

создание электронно-дырочных переходов в полупроводниках вплавлением, диффузией, последовательным легированием, трафаретной печатью (шелкографией), методами планарной и элионной технологии.

Для этих операций характерны единицы температуры и количества вещества, а также производные единицы теплоты физической химии и молекулярной физики. Две первые единицы являются основными СИ (см. табл. 2); их кратные и дольные приведены в табл. 25.

Таблица 25. Кратные и дольные основных единиц СИ

Величина		Обозначение	
наименование	символ	единиц СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Термодинамическая температура	T	К	МК, кК, мК, мкК
Количество вещества	n	моль	кмоль, ммоль, мкмоль

Кроме температуры в кельвинах (К) допускается применять также температуру в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). В электронной технике иногда встречается температурная шкала Фаренгейта. Формулы для перевода числовых значений ϑ температуры в кельвины или градусы Цельсия приведены в табл. 26. Так, если температура $\vartheta = -100^{\circ}\text{F}$, $t = -55,55 - 17,77 = -73,32^{\circ}\text{C}$.

Т а б л и ц а 26. Температурные шкалы

Единицы температуры		Соотно- шение с единицей СИ—кель- вином (К)	Перевод числовых значений температуры θ					Температурные точки, в единицах θ	
			в кельвинах (К)		в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)				
			обзна- чение	точка начала отсчета по θ -шка- ле, К	пересчетная фор- мула	точка начала отсчета по θ -шкале, $^{\circ}\text{C}$	пересчетная фор- мула		
Кельвин	К	1	0	—	—	—273,15	19—273,15	273,15	373,15
Градус Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	1	273,15	19+273,15	0	0	—	0	100
Градус Фаренгейта	$^{\circ}\text{F}$	5/9	~255,37	0,5(5)9+255,37	—17,7(7)	0,5(5)9—17,7(7)	32	212	

Что касается единицы количества вещества, то по определению моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (частей), сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля необходимо указывать, к каким частицам — атомам, молекулам, ионам, электронам — или их группам относится эта единица. Таким образом, понятием количества вещества определяется число, а не масса составляющих его конкретных частиц. Другими словами, моль всегда содержит число Авогадро ($6,022045 \cdot 10^{23}$) частиц. Постоянная Авогадро является размерной величиной (моль⁻¹)

$$L = 0,012 / m_{12C},$$

где m_{12C} — масса одного атома углерода-12, кг.

Особенность моля состоит в том, что число Авогадро не может быть определено точно. Применяя единицу количества вещества и ее производные, необходимо выполнять ряд правил.

Нельзя пользоваться выражениями грамм-моль, грамм-молекула и т. п.

Правильно:

моль
киломоль
моль (атомов)
моль (молекул)

Неправильно:

грамм-моль
килограмм-моль
грамм-атом
грамм-молекула

Нельзя считать одинаковыми разные по смыслу прилагательные молярный (от моля) и молекулярный (от частицы вещества), например, молярная концентрация компонента — отношение количества компонента к объему смеси (или раствора); молекулярная концентрация компонента — отношение числа молекул компонента к объему смеси (или раствора).

Поскольку ранее понятие моля связывали с массой, выраженной в граммах, необходимо знать, что:

относительная атомная A_r и относительная молекулярная M_r массы — безразмерные величины, т. е. отношения масс атома m_A или молекулы m_M данного вещества к $1/12$ части массы атома углерода-12:

$$A_r = \frac{m_A}{\frac{1}{12} m_{12C}}; \quad M_r = \frac{m_M}{\frac{1}{12} m_{12C}}.$$

Так, для графита (естественная смесь изотопов углерода) $A_r = 12,011$, для воды $M_r = 18,0148$ и т. п. Прежде эти числа называли бы атомным (молекулярным) весом или массой, но без прилагательного «относительная»; однако подобная терминология неверна;

молярная масса $M(X)$ вещества, состоящего из специфицированных частиц X , равна отношению массы m порции вещества к количеству вещества $n(X)$ в этой порции: $M(X) = m/n(X)$ (например, $M(\text{Ca}) = 40,08$ г/моль; $M(\text{HgCl}) = 236,045$ г/моль). Таким образом, молярная масса — размерная производная, и ее единицей является килограмм на моль (кг/моль).

Поскольку молярная масса M относится к общей массе частиц, взятых в количестве, равном числу Авогадро ($M = m_{\text{част}} L$, где $m_{\text{част}}$ — масса данного атома, иона и т. д.), то

$$m_{\text{част}} = {}^{1/12} m_{12\text{C}} A_r = {}^{1/12} m_{12\text{C}} M_r;$$

$$M = {}^{1/12} m_{12\text{C}} L A_r = {}^{1/12} m_{12\text{C}} L M_r.$$

Так как по определению моля $m_{12\text{C}} L = 0,012$ кг/моль и ${}^{1/12} m_{12\text{C}} L = 0,001$ кг/моль, то $M = 10^{-3} A_r = 10^{-3} M_r$ кг/моль. Следовательно, в СИ числовое значение молярной массы равно относительной молекулярной массе, деленной на 1000.

Нельзя, наконец, упускать из вида, что когерентные формулы СИ обычно включают именно молярную, а не относительную атомную или относительную молекулярную массу. Таким образом, прежние значения атомного (молекулярного) веса нужно умножать на размерный числовой коэффициент 10^{-3} кг/моль * ($M = M_r/1000$). Например, согласно приведенной ранее формуле среднеарифметическая скорость v молекул водорода ($M = 2,016 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) при $T = 300$ К равна $4,60 \times (300/2,016 \cdot 10^{-3})^{1/2} = 1774$ м/с. Если же использовать молекулярный вес водорода ($M = 2,016$), результат будет ошибочным).

Моль является расчетной единицей, и его эталона не существует.

Кратные и дольные производных единиц СИ, относящихся к теплоте, физической химии и молекулярной физике, приведены в табл. 27.

* Единственный в СИ случай, когда такой коэффициент необходим для связи двух производных единиц когерентной системы.

Таблица 27. Кратные и дольные производных единиц СИ, относящихся к теплоте, физической химии и молекулярной физике

Величина		Обозначение	
наименование	символ	единицы СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Температурный коэффициент	α_1, β	K^{-1}	—
Градиент температуры	$\text{grad } T$	K/m	—
Теплопроводность	λ	$Вт/(м \cdot K)$	—
Температуропроводность	a	m^2/c	—
Коэффициент теплопередачи	h, K	$Вт/(м^2 \cdot K)$	—
Удельное количество теплоты	q	$Дж/кг$	$МДж/кг, Дж/г$
Теплоемкость	C	$Дж/К$	$кДж/К$
Энтродия	S		
Удельная теплоемкость	c	$Дж/(кг \cdot K)$	$Дж/(г \cdot K)$
Удельная энтродия	s		
Молярная энтальпия	H_m	$Дж/моль$	$кДж/моль$
Химический потенциал	μ		
Молярная теплоемкость	C_m	$Дж/(моль \cdot K)$	—
Молярная энтродия	S_m		
Относительная атомная масса	A_r	Безразмерная	—
Относительная молекулярная масса	M_r	То же	—
Молярная масса	M	$кг/моль$	$г/моль$
Молярный объем	V_m	$м^3/моль$	—
Молярная концентрация	C_B	$моль/м^3$	$кмоль/м^3$
Плотность числа частиц	n	$м^{-3}$	—
Градиент концентрации	—	$м^{-4}$	—
Коэффициент диффузии	D	$м^2/c$	—
Удельная адсорбция	—	$моль/кг$	$ммоль/кг$
Величина адсорбции (молярная)	—	$моль/м^2$	$ммоль/м^2$

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ
Плотность потока энергии, поверхностная плотность теплового потока	калория на секунду-квадратный сантиметр	кал/(с·см ²)	4,19·10 ⁴ Вт/м ²
	килокалория на час-квадратный метр	ккал/(ч·м ²)	1,16 Вт/м ²
	эрг на секунду-квадратный сантиметр	эрг/(с·см ²)	10 ⁻³ Вт/м ²
	калория на секунду-сантиметр-градус Цельсия	кал/(с·см·град)	4,19·10 ² Вт/(м·К)
Теплопроводность	килокалория на час-метр-градус Цельсия	ккал/(ч·м·град)	1,16 Вт/(м·К)
	эрг на секунду-сантиметр-градус Цельсия	эрг/(с·см·град)	10 ⁻⁵ Вт/(м·К)
	калория на секунду-квадратный сантиметр-градус Цельсия	кал/(с·см ² ·град)	4,19·10 ⁴ Вт/(м ² ·К)
	килокалория на час-квадратный метр-градус Цельсия	ккал/(ч·м ² ·град)	1,16 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплопередачи	эрг на секунду-квадратный сантиметр-градус Цельсия	эрг/(с·см ² ·град)	10 ⁻³ Вт/(м ² ·К)
	калория на градус Цельсия	кал/г	4,19·10 ³ Дж/кг
	эрг на градус Цельсия	эрг/г	10 ⁻⁴ Дж/кг
	калория на градус Цельсия	кал/град	4,19 Дж/К
Удельное количество теплоты, удельная теплота фазового превращения	калория на градус Цельсия	эрг/град	10 ⁻⁷ Дж/К
	калория на грамм-градус Цельсия	кал/(г·град)	4,19·10 ³ Дж/(кг·К)
	эрг на грамм-градус Цельсия	эрг/(г·град)	10 ⁻⁴ Дж/(кг·К)
	калория на градус Цельсия	кал/град	4,19 Дж/К
Теплоемкость, энтропия	калория на градус Цельсия	эрг/град	10 ⁻⁷ Дж/К
	калория на грамм-градус Цельсия	кал/(г·град)	4,19·10 ³ Дж/(кг·К)
	эрг на грамм-градус Цельсия	эрг/(г·град)	10 ⁻⁴ Дж/(кг·К)
	калория на градус Цельсия	кал/град	4,19 Дж/К

Кроме того, допускается использовать следующие производные:

Наименование величины	Обозначение единиц
Молярный объем	л/моль
Молярная концентрация	моль/л
Плотность числа частиц	л ⁻¹

Для перевода в СИ наиболее распространенных внесистемных тепловых единиц, основанных на эрге и калории, может быть рекомендована табл. 28.

При пересчете других единиц (кал/с, ккал/моль, эрг/см³), достаточно иметь в виду, что единица массы (например, грамм) в любом обозначении производной может быть автоматически заменена единицей количества вещества (моль) и что 1°C = 1 К; 1 кал = 4,1868 Дж (точно); 1 эрг = 10⁻⁷ Дж.

§ 9. Единицы физических величин, относящихся к электричеству и магнетизму

В области электронной техники единицы физических величин, относящиеся к электричеству и магнетизму, встречаются при электрофизической обработке материалов, в электротехнологии, а также радио- и электроизмерениях.

Под электрофизической обработкой принято понимать операции, в которых прежде всего используются электрические и магнитные физические процессы. Таковыми операциями являются:

электроэрозионное формообразование, очистка и сварка (искровая, импульсная, контактная, анодно-механическая); электрохимическое фрезерование, шлифование, резка, прошивка отверстий, удаление заусенцев; травление в газовом разряде и масс-сепарация; обезжиривание, промывка или сварка с помощью ультразвука и магнитоимпульсная штамповка; гальванопластика, включая анодирование; особая техника нанесения покрытий (электрофорез, осаждение в электростатическом поле, ионно-плазменное или реактивное напыление);

элионная обработка;

нетермические методы создания электронно-дырочных переходов, особенно ионная имплантация, т. е. непосредственное введение в полупроводник ионизирован-

ных и ускоренных сильным полем частиц донорной или акцепторной примеси.

К электротехнологии относятся:

нагрев токами высокой частоты и электронной бомбардировкой;

разрядное активирование (например, термо- и фотоэмиттеров или выпрямляющих контактов);

тренировка изделий для стабилизации их характеристик.

Радио- и электроизмерения, а также испытания распространяются как на готовые приборы или устройства (например, контроль токовых нагрузок, пробивного напряжения, мощности рассеяния, СВЧ-параметров, эмиссии, шумов и др.), так и на материалы и технологические процессы.

Основной (исходной) физической величиной в области электричества и магнетизма является сила электрического тока I . Согласно СИ ее единица — ампер (А) 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, вызывал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Это определение основывается на электродинамической формуле Ампера и из него следует важное равенство

$$B \cdot A \cdot c = H \cdot m.$$

В отличие, например, от единиц длины, массы, температуры какие-либо другие технические или национальные единицы силы тока не применялись. Однако до введения СИ в физике использовали, как отмечалось, различные системы единиц электромагнетизма, где по-другому выглядит не только размер, но и определение этой единицы. При точных измерениях ампер (СИ) оказался, кроме того, несколько большим, чем было установлено ранее (электрохимическим путем), и зафиксировано с помощью эталона, так называемого Международного ампера. Для перехода к СИ от единиц, использовавшихся до 1948 г., нужно считать, что

1 средн. межд. ампер = 0,99985 А

1 средн. межд. ватт = 1,00019 Вт

1 средн. межд. вольт = 1,00034 В

1 средн. межд. кулон = 0,99985 Кл

1 средн. межд. ом = 1,00049 Ом

1 средн. межд. фарада = 0,99951 Ф

1 средн. межд. вебер = 1,00034 Вб

1 средн. межд. генри = 1,00049 Гн

Если речь идет не о специальных особо точных измерениях, эти различия несущественны, и для всех единиц электротехники вполне правильно

1 межд. электротехн. ед. = 1 ед. СИ.

(Уточнение «международный» вызвано тем, что между эталонами, принадлежащими различным странам, существовали небольшие расхождения.)

Рекомендуемыми десятичными кратными и дольными ампера являются кА, мА, мкА, нА, пА.

§ 10. Рационализация уравнений электромагнетизма

Электрические и магнитные единицы СИ образуют в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля Максвелла.

До недавнего времени учение об электричестве строилось на основе уравнения Кулона. При этом получают так называемую симметричную, но внутренне некогерентную СГС-систему электрических и магнитных единиц, именуемую также системой Гаусса. Основы ее лежат в следующем. Излагая начальные представления электростатики, вводят кулоновскую силу взаимодействия двух точечных зарядов Q_1 и Q_2

$$F = Q_1 Q_2 / (\varepsilon r^2), \quad (1)$$

где ε — постоянная, характеризующая диэлектрические свойства среды; r — расстояние между зарядами.

Закон Кулона (1) позволяет установить единицу заряда. Для этого в соответствии с принятой в механике СГС-системой полагают, что $F = 1$ дин, $r = 1$ см, а ε — безразмерная величина, показывающая соотношение между диэлектрическими проницаемостями данной среды и вакуума. Для вакуума $\varepsilon_0' = 1$. Тогда размерность заряда $[Q] = (\text{г} \cdot \text{см} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2)^{1/2} = \text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$. Определив таким образом одну из электростатических единиц, устанавливают размерности других, например силы тока $I = Q/t$, (где t — время): $[I] = \text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-2}$, напряженности

электрического поля, потенциала, вектора электрического смещения и др. В результате получают группу электрических единиц, которую принято называть СГСЭ-системой.

Желая избавиться от совпадения единиц ряда производных, диэлектрической проницаемости вакуума иногда придают некоторую размерность ϵ_0 , т. е. новое свойство, не выражаемое через другие единицы, не имеющее названия и численно равное 1. Таким образом возникает СГС ϵ_0 -система, которая ничем не отличается от СГСЭ, кроме того, что ее единицы содержат символ ϵ_0 в какой-либо степени (например, единица заряда СГС ϵ_0 — это $\text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \epsilon_0^{1/2}$).

Положение, однако, меняется при рассмотрении магнитного взаимодействия токов. Для двух параллельных токов I_1 и I_2 механическая сила определяется электродинамической формулой Ампера (Л. 10 и 16)

$$F = 2\mu I_1 I_2 l / r, \quad (2)$$

где μ — магнитная проницаемость среды; l — длина каждого проводника; r — расстояние между проводниками. Применительно к СГС-системе при $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$, $l = r = 1 \text{ см}$, $\mu = 1^*$ и $F = 2 \text{ дин}$ (поскольку помедотормный эффект относится к двум проводникам) размерность силы тока $[I] = (\text{дин})^{1/2} = \text{см}^{1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$ не совпадает с полученной в электростатике. На основе этой единицы можно установить взаимосвязь различных магнитных величин (магнитной индукции, момента контура с током, напряженности магнитного поля и др.). В результате возникает самостоятельная СГСМ-система магнитных единиц **, также не имеющая внутренних противоречий, но неогерентная СГСЭ-системе. Единицы одной из этих систем нельзя использовать в рамках другой; подстановка электрических величин в формулы магнетизма (и наоборот) приводит к ошибкам.

Искусственное объединение СГСЭ- и СГСМ-систем приводит к системе Гаусса, электрические единицы которой полностью совпадают с единицами СГСЭ, а магнитные — с единицами СГСМ. Взаимная связь их осуществляется с помощью множителей $1/c$ и $1/c^2$, где c —

* Магнитную проницаемость μ' вакуума здесь также принимают равной безразмерной 1.

** Придавая магнитной проницаемости размерность μ_0 , получают систему СГС μ_0 .

скорость света, которая выравнивает размерности единиц, но, не делая систему когерентной в целом, изменяет ряд формул. Так, формула (2) превращается в

$$F = (1/c^2)(2\mu I_1 I_2 l/r). \quad (3)$$

Неудобства этого очевидны. Действительно, если в какое-либо выражение входят как электрические, так и магнитные величины, чаще всего приходится догадываться, какие именно единицы должны быть использованы для расчетов. Например, в одном из методов определения удельного заряда электрона

$$e/m = 8U \sin^2 \alpha / (B^2 r^2),$$

где U — ускоряющая разность потенциалов; B — магнитная индукция; r — расстояние и α — угол, характеризующие геометрию измерительного устройства. Если считать, что B выражается, как обычно для системы Гаусса, в гауссах, правильный результат (причем в единице СГСМ-заряда на грамм) может быть получен, если взять электрическое напряжение не в вольтах и не в СГСЭ-единицах, а в СГСМ-единицах, размерность которых $\text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-2}$ при соотношении $1 \text{ В} = 10^8 \text{ СГСМ-ед. потенциала}$.

Кроме того, размеры единиц для одной и той же физической величины в СГСЭ- и СГСМ-системах очень далеки друг от друга. Так, для электрического сопротивления $1 \text{ СГСЭ-ед.} = 8,99 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$, а $1 \text{ СГСМ-ед.} = 10^{-9} \text{ Ом}$.

Подобная трудность не возникает, если при изложении курса электромагнетизма сначала рассматривают не частные случаи силового взаимодействия зарядов или токов, а общие законы электродинамики (уравнения Максвелла). Из этих законов можно получить основные формулы электромагнетизма и одновременно законченную и непротиворечивую систему единиц. Однако такая методология сложна.

Рационализация уравнений электромагнитного поля состоит в том, что из них исключают числовые множители, т. е. 4 π и размерную электродинамическую постоянную c . Тогда, стараясь сохранить привычные размерности таких основных электрических величин, как напряженность поля (\bar{E} в В/м), плотность тока (j в А/м²) и объемная плотность заряда (ρ в Кл/м³), приходится по сравнению с системой Гаусса, брать другие размерно-

сти магнитной индукции \bar{B} , напряженности магнитного поля \bar{H} , электрического смещения \bar{D} и т. п. Кроме того, числовые значения некоторых величин изменяются в $1/c$, $1/c^2$, 4π , $4\pi c$ и $4\pi/c$ раз.

Преобразования подвергнутся и некоторые формулы электротехники, поскольку они вытекают из уравнений Максвелла *; в отдельных случаях из них также исчезнут постоянные 4π и c или их сочетания, которые могут появиться в других формулах. Безразмерный коэффициент 4π можно скомпенсировать изменением в 4π раз какой-либо другой безразмерной величины, например относительной проницаемости. В отношении размерной константы c этот прием непригоден. Кроме того, с помощью этой единственной размерной постоянной невозможно построить когерентную систему электромагнитных единиц, так как природу электрических явлений нельзя свести к механическому взаимодействию зарядов или токов. Поэтому целесообразно воспользоваться дополнительной независимой величиной подобно тому, как для характеристики кинетической энергии хаотического движения частиц используют температуру. Выбор такой величины и ее единицы произволен.

Согласно теоретической метрологии введение в какую-либо систему новой основной единицы (в данном случае ампера) влечет за собой увеличение количества необходимых для ее построения размерных констант. Оказывается, что когерентную систему электрических и магнитных единиц можно построить при двух размерных константах. При этом скорость света можно заменить другой подходящей размерной постоянной, скомбинировав ее со вновь вводимой таким образом, чтобы можно было добиться наилучшей симметрии единиц. Упрощенная процедура рационализации выглядит следующим образом.

Приняв силу электрического тока за одну из основных физических величин, используют в качестве уравнения связи механических и электромагнитных единиц не закон Кулона (1), а формулу Ампера (2), дополнив ее некоторой размерной константой μ_0 и делителем 4π :

$$F = \mu_0 I_1 I_2 / (2\pi r), \quad (4)$$

что полностью соответствует рационализированным урав-

*Некоторые формулы могут не изменяться.

нениям Максвелла. Если принять для вакуума $\mu=1$, $I_1=I_2=1$ А и $l=r=1$ м, то согласно формуле (4)

$$2 \cdot 10^{-7} = 1 \cdot \mu_0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 / (2\pi \cdot 1),$$

что определяет значение и единицу

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2. \quad (5)$$

Так как

$$\text{Н/А}^2 = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вб}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \Gamma_{\text{Н/м}},$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,2566 \dots \cdot 10^{-6} \text{ ГН/м}.$$

Поскольку в исходной формуле (4) скорость света отсутствует, μ_0 может рассматриваться как новая размерная константа, которая появилась в связи с независимой единицей силы тока. Ей присвоено название магнитной постоянной. Формально, хотя физически неправильно, μ_0 имеет смысл абсолютной магнитной проницаемости вакуума.

Магнитная постоянная может входить в формулы любой когерентной системы единиц как дополнение к электродинамической постоянной c . Однако, поскольку электродинамическая постоянная исключена из уравнений Максвелла, целесообразно заменить ее другой размерной константой, выраженной через c и μ_0 . Для этого сравним попарно уравнения, записанные в гауссовой и рационализованной форме:

$$F = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{2\mu_0' I_1 I_2 l}{r} \text{ и } F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} \quad (\text{формула Ампера});$$

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon \epsilon_0' r^2} \text{ и } F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^2} \quad (\text{закон Кулона}),$$

где ϵ_0' и μ_0' — безразмерные коэффициенты пропорциональности.

При одинаковых силах F

$$\frac{2\mu_0'}{c^2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \text{ и } 4\pi = \frac{\mu_0}{\mu_0'} c^2;$$

$$\frac{1}{\epsilon_0'} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \text{ и } 4\pi = \frac{\epsilon_0'}{\epsilon_0}.$$

Таким образом,

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \epsilon'_0 \mu'_0.$$

Так как в системе Гаусса $\epsilon'_0 = \mu'_0 = 1$, выбор новой постоянной ϵ_0 сводится к тому, что

$$\sqrt{\epsilon_0 \mu'_0} = 1/c. \quad (6)$$

Следовательно,

$$\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 10^{-7} c^2) \quad (7)$$

или

$$\epsilon_0 = 8,8541... \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Найденную размерную величину называют *электрической постоянной*. (Формально она имеет смысл абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума.) В отличие от μ_0 числовое значение ϵ_0 приближенно и определяется с той точностью, с которой известна скорость света.

Постоянные ϵ_0 и μ_0 входят наряду с относительными проницаемостями ϵ и μ в различные уравнения электромагнетизма. Следует подчеркнуть, что рационализация вовсе не является следствием перехода на СИ, а основная ее цель — обеспечение когерентности электрических и магнитных величин. Результаты рационализации состоят в следующем.

Размерная электродинамическая постоянная c исключается из всех формул магнетизма, кроме уравнения (6). Так, формула плотности потока энергии $\bar{S} = c/4\pi \cdot [\vec{E}\vec{H}]$ после рационализации превращается в $\bar{S} = [\vec{E}\vec{H}]$.

Во всех выражениях с относительной диэлектрической ϵ или магнитной μ проницаемостью соответственно появляется одна из размерных констант ϵ_0 или μ_0 .

До рационализации:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

После рационализации:

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

Безразмерный множитель 4π перемещается из одних формул в другие. Необходимо отметить, что ранее его наличие, отражающее круговые свойства пространства, было трудно объяснить физически. После рационализации этот множитель появляется там, где имеется сфери-

ческая (как в законе Кулона) или цилиндрическая симметрия. Так, емкость C плоского I и цилиндрического II конденсаторов выражается следующими уравнениями.

До рационализации:

$$\text{I } C = \epsilon S / (4\pi d);$$

$$\text{II } C = \epsilon l / [2 \ln(r_2/r_1)];$$

После рационализации:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d;$$

$$C = 2\pi \epsilon \epsilon_0 l / [\ln(r_2/r_1)],$$

где S , d , l , r_1 и r_2 — геометрические размеры конденсаторов.

Наиболее важные формулы, например объемной плотности энергии магнитного поля I и индуктивности II соленоида, освобождаются от иррационального числа π .

До рационализации:

$$\text{I } \omega = \mu \bar{H}^2 / (8\pi);$$

$$\text{II } L = 4\pi \mu N^2 S / l;$$

После рационализации:

$$\omega = \mu \mu_0 \bar{H}^2 / 2;$$

$$L = \mu \mu_0 N^2 S / l,$$

где N — число витков соленоида.

Система базовых величин и единиц электромагнетизма может быть представлена в следующем симметричном и удобном для запоминания виде.

Согласно этой схеме единицы получают делением электромагнитной мощности на ампер для электрических и на вольт для магнитных величин с последующим использованием уравнений связи. В квадратные скобки заключены символы \bar{D} , \bar{E} и \bar{H} величин, единицы которых не имеют собственного наименования. Безразмерный множитель 1 опущен.

Схема, хотя и удобна для запоминания, но является формальной. Строго физически нельзя проводить аналогию между векторами \bar{D} и \bar{B} , с одной стороны, и \bar{E} и \bar{H} , с другой. Силовым вектором магнетизма \bar{B} является индукция, и в этом смысле она, а не напряженность магнитного поля \bar{H} , подобна напряженности \bar{E} электрического поля, т. е. \bar{E} и \bar{B} — интенсивные, а \bar{D} и \bar{H} — экстенсивные величины.

Величины электромагнетизма, выраженные в единицах СИ, можно подставлять в любые рационализованные формулы. При этом соблюдается полная когерентность как между ними, так и относительно остальных единиц СИ. Так, применяя единицы кулон, вебер, тесла, не надо думать, магнитные они или электрические, или использовать какие-либо пересчетные коэффициенты.

Электромагнитная мощность, Вт

Электрические единицы

Ток — изменение числа носителей электрического заряда в единицу времени под действием напряжения — электродвижущей силы (эдс), А

Электродвижущая сила; напряжение, электрический потенциал
$$В = Вт/А$$

Количество электричества (заряд): поляризация; поток Ψ электрического смещения
$$Кл = А \cdot с$$

Электрическое сопротивление — отношение эдс к порождаемому ею электрическому току
$$Ом = В/А$$

Электрическая проводимость
$$См = Ом^{-1}$$

Емкость — отношение электрического заряда к эдс
$$Ф = Кл/В$$

Электрическое смещение
$$[\vec{D}] = Кл/м^2$$
, равное $\epsilon\epsilon_0\vec{E}$, где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot с^2)$ Ф/м — электрическая постоянная

Магнитные единицы

Изменение числа магнитных силовых линий в единицу времени под действием тока — магнитодвижущей силы (мдс), В

Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов
$$А = Вт/В$$

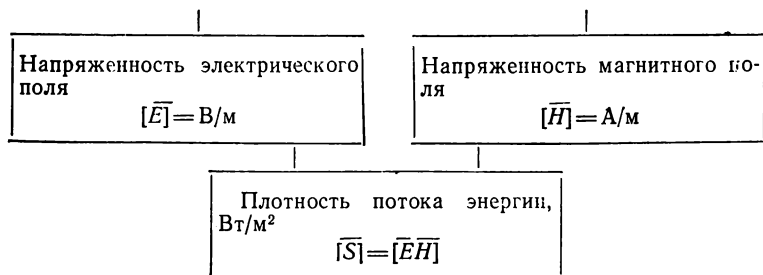
«Количество магнетизма» — общее изменение числа магнитных силовых линий; поток Φ магнитной индукции
$$Вб = В \cdot с$$

Магнитное сопротивление — отношение мдс к связанному с ней магнитному потоку
$$Гн^{-1} = А/Вб$$

Магнитная проводимость
$$Гн = Вб/А$$

Индуктивность — отношение потока магнитной индукции к мдс
$$Гн = Вб/А$$

Магнитная индукция
$$Тл = Вб/м^2$$
,
равная $\mu\mu_0\vec{H}$, где μ — относительная магнитная проницаемость среды;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная



§ 11. Производные единицы физических величин электромагнетизма

Важнейшие кратные и дольные производные единицы физических величин электромагнетизма даны в табл. 29, построенной в соответствии с приведенной выше схемой.

В табл. 30 приведены соотношения для перевода в СИ электрических, а в табл. 31 — магнитных единиц симметричной системы Гаусса, а также некоторых, применяемых в технике единиц (ампер-час, ом-квадратный миллиметр на метр). Последовательность расположения величин в табл. 30 и 31 совпадает с табл. 29, а единиц и соответственно пересчетных коэффициентов установлена следующим образом.

Для электрических величин:

СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0 -ед.
 СГСМ и СГС μ_0 -ед.
 практические единицы.

Для магнитных величин:

СГС, СГСМ и СГС μ_0 -ед.
 СГСЭ и СГС ϵ_0 -ед.
 практические единицы.

Числовые значения как электрических, так и магнитных величин для каждой колонки внутри первой и второй строк совпадают; при этом единицы совпадают не всегда.

Для СГС-единиц, не имеющих специальных наименований, полное название (например, единица силы тока СГС) дается только в первых двух строках табл. 30 и 31; далее даны сокращения. Значение скорости света в четвертом столбце следует брать в СГС-единицах ($c = 2,998 \cdot 10^{10}$ см/с). В каждой из двух парных строк этого столбца пересчетный коэффициент получен отбрасыванием постоянной c или c^2 в предыдущей (табл. 30)

Величина		Обозначения	
наименование	символ	единиц СИ	рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$U (V)$	В	МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ
Количество электричества, электрический заряд	Q	Кл	кКл, мкКл, нКл, пКл
Поток электрического смещения	Ψ	Кл	МКл, кКл, мКл
Электрическое сопротивление	R	Ом	ТОм, ГОм, МОм, КОм, МОм, мКОм
Электрическая проводимость	G	См	кСм, мСм, мкСм
Электрическая емкость	C	Ф	мФ, мкФ, нФ, пФ
Электрическое смещение	D	Кл/м ²	МКл/м ² , кКл/м ² , мКл/м ² , мкКл/м ²
Относительная диэлектрическая проницаемость	ϵ	Безразмерная	—
Электрическая постоянная, абсолютная диэлектрическая проницаемость	ϵ_0	Ф/м	мкФ/м, нФ/м, пФ/м
Напряженность электрического поля	\vec{E}	В/м	МВ/м, кВ/м (В/мм), мВ/м, мкВ/м
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	F_m, U_m	А	кА, мА
Поток магнитной индукции, магнитный поток	Φ	Вб	мВб
Магнитное сопротивление	R_m	Гн ⁻¹	—
Магнитная проводимость	G_m	Гн	—
Индуктивность, взаимная индуктивность	L	Гн	мГн, мкГн, нГн, пГн
Магнитная индукция, плотность магнитного потока	\vec{B}	Тл	мТл, мкТл, нТл
Относительная магнитная проницаемость	μ	Безразмерная	—
Магнитная постоянная, абсолютная магнитная проницаемость	μ_0	Гн/м	мкГн/м, нГн/м

Напряженность магнитного поля	\vec{H}	А/м	кА/м (А/мм)
Плотность потока энергии	\vec{S}	Вт/м ²	МВт/м ² , кВт/м ² , мВт/м ²
Плотность электрического тока	I	А/м ²	А/мм ² , кА/м ²
Линейная плотность электрического тока	$A(\alpha)$	А/м	кА/м (А/мм)
Пространственная плотность электрического заряда	ρ	Кл/м ³	Кл/мм ³ , МКл/м ³ , кКл/м ³ , мКл/м ³ , мкКл/м ³
Поверхностная плотность электрического заряда	σ	Кл/м ²	Кл/мм ² , кКл/м ² , мКл/м ² , мкКл/м ²
Поляризованность	\vec{P}	Кл/м ²	Кл/мм ² , кКл/м ² , мКл/м ² , мкКл/м ²
Электрический момент диполя	p	Кл·м	—
Удельное электрическое сопротивление	ρ	См·м	ГОм·м, МОм·м, КОм·м, МОм·м, мКОм·м, пОм·м
Удельная электрическая проводимость	α	См/м	МСм/м, кСм/м
Электрическая поляризуемость	—	м ³	—
Диэлектрическая восприимчивость (относительная)	—	Безразмерная	—
Подвижность носителей тока	—	м ² /(В·с)	—
Эмиссионная постоянная	—	А/(м ² ·К ²)	—
Электрохимический эквивалент	—	кг/Кл	—
Магнитный момент (амперовский)	—	А·м ²	—
Намагниченность	\vec{M}	А/м	кА/м (А/мм)
Магнитная восприимчивость	χ_m	Безразмерная	—

Таблица 30. Перевод в СИ электрических единиц

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ	
			полное	расчетное
Сила электрического тока	единица силы тока СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	10/с А	$3,34 \cdot 10^{-10}$ А
	единица силы тока СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10 А	10 А
	био-	био	10 А	10 А
	ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	10^{-8} ·с В	300 В
	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10^{-8} В	10^{-8} В
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	10/с Кл	$3,34 \cdot 10^{-10}$ Кл
	франклин	Фр, Ф	10/с Кл	$3,34 \cdot 10^{-10}$ Кл
	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10 Кл	10 Кл
	ампер-час	А·ч	—	3600 Кл
	фардей	Ф, F	—	96500 Кл
Поток электрического смещения	ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	10/(4πс) Кл	$2,65 \cdot 10^{-11}$ Кл
	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10/(4π) Кл	0,796 Кл
Электрическое сопротивление	ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	10^{-9} ·с ² Ом	$8,99 \cdot 10^{11}$ Ом
	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10^{-9} Ом	10^{-9} Ом
	ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀}	—	$10^9/c^2$ См	$1,11 \cdot 10^{-12}$ См
	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10^9 См	10^9 См
	сантиметр (ед. СГС, СГСЭ и СГС _{ε₀})	см	$10^9/c^2$ Ф	$1,11 \cdot 10^{-12}$ Ф
Электрическая емкость	ед. СГСМ и СГС _{μ₀}	—	10^9 Ф	10^9 Ф

Электрическое смещение	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^5/(4\pi c)$ Кл/м ²	$2,65 \cdot 10^{-7}$ Кл/м ²
Относительная диэлектрическая проницаемость	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$10^5/(4\pi)$ Кл/м ²	$7,96 \cdot 10^3$ Кл/м ²
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^{11}/(4\pi c^2)$ Ф/м	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Напряженность электрического поля	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$10^{11}/(4\pi)$ Ф/м	$7,96 \cdot 10^9$ Ф/м
	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^{-6} \cdot c$ В/м	$3 \cdot 10^4$ В/м
	вольт на сантиметр	В/см	—	10^{-6} В/м
Плотность электрического тока	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^5/c$ А/м ²	100 В/м
	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	10^5 А/м ²	$3,34 \cdot 10^{-6}$ А/м ²
	ампер на квадратный сантиметр	А/см ²	—	10^4 А/м ²
	ампер на квадратный миллиметр	А/мм ²	—	10^6 А/м ²
Линейная плотность электрического тока	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10^7 Кл/м ³	$3,34 \cdot 10^{-6}$ А/м
Пространственная плотность электрического заряда	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$10^5/c$ А/м	10^5 А/м
Поверхностная плотность электрического заряда	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^7/c$ Кл/м ³	$3,34 \cdot 10^{-4}$ Кл/м ³
Поляризованность	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$10^5/c$ Кл/м ²	$3,34 \cdot 10^{-6}$ Кл/м ²
	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^5/c$ Кл/м ²	10^5 Кл/м ²
	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$10^5/c$ Кл/м ²	$3,34 \cdot 10^{-6}$ Кл/м ²
Электрический момент диполя	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^{-1}/c$ Кл·м	$3,34 \cdot 10^{-12}$ Кл·м
	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	$0,1$ Кл·м	$0,1$ Кл·м
	дебай	Д	—	$3,34 \cdot 10^{-30}$ Кл·м
Удельное электрическое сопротивление	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^{-11} \cdot c^2$ Ом·м	$8,99 \cdot 10^9$ Ом·м
	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	10^{-11} Ом·м	10^{-11} Ом·м
	Ом-сантиметр	Ом·см	—	10^{-2} Ом·м
	Ом-квадратный миллиметр на метр	Ом·мм ² /м	—	10^{-6} Ом·м

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ	
			полное	расчетное
Удельная электрическая проводимость	ед. СГС, СГСЭ и СГС ϵ_0	—	$10^{11}/\epsilon^2 \text{См/м}$	$1,11 \cdot 10^{-10} \text{См/м}$
Электрическая поляризуемость	ед. СГСМ и СГС μ_0	—	10^{11}См/м	10^{11}См/м
Диэлектрическая восприимчивость (относительная)	Безразмерная единица	см ³	—	10^{-6}м^3
Подвижность носителей тока	сантиметр в квадрате на вольт-секунду	—	4л	12,6
Эмиссионная постоянная	ампер на сантиметр в квадрате-кельвин в квадрате	см ² /(В·с)	—	$10^{-4} \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Электрохимический эквивалент	грамм на кулон	А/(см ² ·К ²)	—	$10^4 \text{А}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$
	грамм на единицу электрического заряда СГСМ	г/Кл	—	10^{-3}кг/Кл
		—	—	10^{-4}кг/Кл

Т а б л и ц а 31. Перевод в СИ магнитных единиц

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение	Соотношение с единицей СИ	
			полное	расчетное
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	гильберт (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0) единица магнитодвижущей силы СГСЭ и СГС ϵ_0	Гб	$10/(4\pi) \text{А}$ $10/(4\pi\epsilon) \text{А}$	0, 796 А $2,65 \cdot 10^{-11} \text{А}$

Поток магнитной индукции, магнитный поток	максвелл (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	Мкс	10 ⁻⁸ Вб	10 ⁻⁸ Вб
Магнитное сопротивление	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁻⁸ · с Вб	300 Вб
Магнитная проводимость	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁹ /(4 π) А/Вб	7,96 · 10 ⁷ А/Вб
Индуктивность, взаимная индуктивность	ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0	—	10 ⁹ /(4 πc^2) А/Вб	8,85 · 10 ⁻¹⁴ А/Вб
	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁻⁹ · 4 π Вб/А	1,26 · 10 ⁻⁸ Вб/А
	сантиметр (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	см	10 ⁻⁹ · 4 πc^2 Вб/А	1,13 · 10 ¹³ Вб/А
	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁻⁹ Гн	10 ⁻⁹ Гн
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	Гс	10 ⁻⁹ · c ² Гн	8,99 · 10 ¹¹ Гн
	гаусс (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	—	10 ⁻⁴ Тл	10 ⁻⁴ Тл
Относительная магнитная проницаемость	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁻⁴ · с Тл	3 · 10 ⁶ Тл
Абсолютная магнитная проницаемость	ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0	—	1	1
Напряженность магнитного поля	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	Э	10 ⁻⁷ · 4 π Гн/м	1,26 · 10 ⁻⁶ Гн/м
	эрстед (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	—	10 ⁻⁷ · 4 πc^2 Гн/м	1,13 · 10 ¹⁵ Гн/м
	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ³ /(4 π) А/м	79,6 А/м
	гамма	—	10 ³ /(4 πc) А/м	2,65 · 10 ⁻⁹ А/м
Магнитный момент (амперовский)	ампер-виток на сантиметр	А · в/см	—	7,96 · 10 ⁻⁴ А/м
Намагниченность	ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0	—	10 ⁻³ А · м ²	100 А/м
	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ⁻³ / c А · м ²	10 ⁻³ А · м ²
	ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0	—	10 ³ А/м	3,34 · 10 ⁻¹⁴ А · м ²
	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	—	10 ³ / c А/м	10 ³ А/м
Магнитная восприимчивость	Безразмерная единица	—	4 π	3,34 · 10 ⁻⁸ А/м
				12,6

или в последующей (табл. 31) строке. Так, для электрической емкости, выраженной в сантиметрах, пересчетный коэффициент равен $10^9/c^2$, а в СГСМ-единицах — 10^9 .

Все логарифмические (относительные) величины (разность уровней мощности, усиление, ослабление и др.) рекомендуется согласно стандарту выражать в децибелах (дБ) с образованием этой единицы, как указано в § 3.

§ 12. Применение единиц физических величин электромагнетизма

Единицы электричества и магнетизма СИ можно применять только в рационализированных формулах, в чем легко убедиться на следующих примерах. Пусть, например, требуется определить силу F , с которой магнитное поле, обладающее индукцией B , действует на электрический заряд Q , движущийся со скоростью v :

$$F = (1/c)QvB \cdot \sin \alpha,$$

где c — скорость света; α — угол.

Подставляя вместо величин единицы СИ, получим

$$[F] = \frac{с}{м} \cdot \text{Кл} \cdot \frac{м}{с} \cdot \text{Тл} = \text{А} \cdot с \cdot \frac{В \cdot с}{м^2} = \text{Дж} \cdot с/м^2 = \text{Н} \cdot с/м.$$

Между тем сила выражается в ньютонах. Ошибка состоит в том, что данная формула является нерационализованной (гауссовой):

$$[F] = \text{СГСЭ-ед. заряда} \times \text{гаусс} = \text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1} \times \\ \times \text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1} = \text{см} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-2} = \text{дин}.$$

Рационализированные уравнения применяются относительно недавно. Наряду с ними встречаются другие, в том числе не соответствующие гауссовой системе. Кроме того, следует учитывать, что рационализация проводилась в два этапа. На первом (по Хевисайду) опускали только множитель 4π , а электродинамическая постоянная c сохранялась. Такой «полурационализированный» подход существовал в 1960—1970 гг. (Л. 16). Существует мнение, что суть рационализации — замена диэлектрической проницаемости в 4π раз меньшей, а магнитной — в 4π раз большей величиной. Это справедливо,

однако, лишь для методологии Хевисайда и, строго говоря, когда под проницаемостями понимают не ϵ и μ , а равные безразмерной единице и обычно опускаемые величины ϵ_0' и μ_0' для вакуума, т. е. когда вместо $\epsilon_0' = 1$ берется $\epsilon_0 = \epsilon_0'/(4\pi)$ и вместо $\mu_0' = 1$ берется $\mu_0 = 4\pi\mu_0'$. Так, для закона Кулона или индуктивности L соленоида получают следующие формулы.

До рационализации:

$$F = Q_1 Q_2 / (\epsilon \epsilon' r^2)$$

$$L = 4\pi\mu\mu_0' N^2 (S/l)$$

После рационализации:

$$F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2)$$

$$L = \mu\mu_0 N^2 (S/l)$$

Однако применительно к формуле (3) это неверно

$$F = (1/c^2) (2\mu\mu_0' I_1 I_2 l/r) \text{ и } F = (1/c^2) [\mu\mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi r)].$$

Хотя основные рационализованные уравнения приводятся в справочниках и учебных пособиях (Л.2, 9 и 10), необходимо отличать нерационализованные формулы от рационализованных и уметь преобразовывать их.

Проверку формулы выполняют, если есть сомнение в ее принадлежности к тому или иному виду. Для этого в нее сначала подставляют единицы СИ. Так как в пределах СИ все соотношения заведомо когерентны, равенство размерностей правой и левой частей означает, что рассматриваемая формула является рационализованной и может быть в любом случае использована для числовых расчетов. Так, электромагнитная мощность, излучаемая движущимся электрическим зарядом,

$$-N = Q^2 \dot{v}^2 / (6\pi\epsilon\epsilon_0 v^3),$$

где Q , v и \dot{v} — заряд, его скорость и ускорение. Поскольку электрическая постоянная ϵ выражается в Ф/м,

$$[N] = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^3}{\text{Ф} \cdot \text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^4} = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Таким образом, формула является рационализованной. Если проверка не приводит к положительному результату, пользоваться единицами СИ нельзя.

Отметим, что рассмотренный прием малопригоден для анализа нерациональных выражений, так как обычно неясно, какие именно единицы следует в них подставлять, и единицы некоторых величин в различных системах, например силы тока СГСЭ и напряжения СГСМ

($\text{см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-2}$), потока магнитной индукции СГСЭ и потока электрического смещения СГСМ ($\text{см}^{1/2} \cdot \text{г}^{1/2}$), часто совпадают.

Рационализация формулы состоит в ее преобразовании к когерентному виду. Для этого, если формула записана в гауссовой системе, что бывает в подавляющем большинстве случаев, руководствуются следующими правилами.

Если в формуле наряду с электрическими и магнитными имеются другие величины (например, пространства — времени, механические, тепловые и т. п.), они переходят в рационализованную формулу без изменений. Требуется лишь, используя обычные пересчетные коэффициенты, выразить в единицах СИ числовые значения величин, т. е. перевести, например, сантиметры в метры, бары в паскалы, кюри в беккерели и т. д. Это относится также к единицам энергии и мощности, независимо от того, заданы ли они как механические (Н·м, эрг/с), тепловые (кал) или электрические (эВ, В·А).

Без изменений из одной формулы в другую переносят символы и числовые значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости. Вместо скорости света c используют множитель $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. Что касается электрических и магнитных величин, то каждую из них, входящую как в правую, так и в левую части исходного выражения, следует умножить на принадлежащий данной величине специальный переводной коэффициент из приведенных в табл. 32. В скорректированную формулу подставляют числовые значения величин в единицах СИ.

Пусть, например, требуется определить энергию, запасаемую в замкнутой тороидальной катушке, имеющей индуктивность $L = 2 \cdot 10^6$ см, при увеличении тока I на 20 А по формуле

$$W = (1/c^2) (LI^2/2).$$

Прямая подстановка заданных числовых значений здесь бессмысленна, поскольку

$$[W] = (c^2/\text{см}^2) (\text{см} \cdot \text{А}^2) = \text{А}^2 \cdot \text{с}^2/\text{см},$$

что не соответствует единице энергии. Кроме того, наличие электродинамической постоянной c свидетельствует

Т а б л и ц а 32. Переводные коэффициенты для рационализации уравнений электромагнетизма, записанных на основе гауссовой системы единиц

Общие величины		Нерационализованная формула (CGS)		Рационализованная формула (СИ)	
Электрические величины	CGS	СИ	Магнитные величины	CGS	СИ
Сила электрического тока, плотность тока; электрический заряд, плотность заряда; поляризованность	$I, \vec{J}, Q, \rho, \vec{P}$	$\frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \cdot (I, \vec{J}, Q, \rho, \vec{P})$	Аналога нет	—	$1/\sqrt{4\pi\epsilon_0}$
Электрическое напряжение, электродвижущая сила	U, V, \vec{E}	$\sqrt{4\pi\epsilon_0} (U, V, \vec{E})$	Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов; напряженность магнитного поля	F_m, U_m, \vec{H}	$\sqrt{4\pi\mu_0} (F_m, U_m, \vec{H})$
напряженность электрического поля					
Электрическое смещение; поток смещения	\vec{D}, Ψ	$\sqrt{4\pi/\epsilon_0} (\vec{D}, \Psi)$	Магнитная индукция; магнитный поток	\vec{B}, Φ	$\sqrt{4\pi/\mu_0} (\vec{B}, \Phi)$
Электрическое сопротивление	R, G	$4\pi\epsilon_0 R$ [1/(4πε ₀)]G	Магнитное сопротивление	R_m	$\mu_0 R_m$ [1/μ ₀] G_m
Электрическая проводимость			Магнитная проводимость	G_m	
Емкость	C	[1/(4πε ₀)]C	Индуктивность	L	$[4\pi/\mu_0]L$ $\sqrt{\mu_0/4\pi} (\overline{m}, \overline{M})$
—	—	—	Магнитный момент; намагниченность	$\overline{m}, \overline{M}$	
Электрическая поляризуемость; диэлектрическая восприимчивость (относительная)	α, χ	[1/(4π)](α, χ)	Магнитная восприимчивость	χ_m	[1/(4π)]·χ _m

о том, что формула нерационализованная. Действительно, при подстановке единиц СИ получается

$$[W] = \frac{c^2}{m^2} \cdot \Gamma_H \cdot A^2 = (c^2/m^2) \cdot (B\phi/A) \cdot A^2 = (c^2/m^2) (B \cdot c) \cdot A = \\ = (c^2/m^2) \cdot (H \cdot m) = c^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м} / (\text{м} \cdot c^2) = \text{кг},$$

что также не соответствует единице энергии.

Полагая, что формула относится к гауссовой системе и используя табл. 32, получим

$$W = \epsilon_0 \mu_0 (1/2) (4\pi/\mu_0) L (1/\sqrt{4\pi\epsilon_0})^2 I^2 = L I^2 / 2.$$

Таким образом,

$$[W] = \Gamma_H \cdot A^2 = (B\phi/A) \cdot A^2 = B \cdot c \cdot A = \text{Дж}.$$

Теперь необходимо пересчитать индуктивность из сантиметров в единицы СИ — генри (см. табл. 31): $1 \text{ см} = 10^{-9} \text{ Гн}$, т. е.

$$W = 0,5 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} \cdot (20)^2 \text{ Дж} = 0,4 \text{ Дж}.$$

Отрицательный результат рационализации в случае, если размерности правой и левой частей преобразованного выражения после подстановки единиц СИ вновь не совпадают, свидетельствует о том, что исходная формула неправильна или записана на основе не гауссовой системы. В этом случае необходимы дополнительные уточнения, вытекающие из следующих правил.

Переводные коэффициенты, приведенные в табл. 32, неприменимы для других, кроме гауссовых, формул. Так, для формулы (2), записанной в «абсолютной системе электрических и магнитных единиц» — СГСМ (Л.12), получается

$$F = 2\mu [1/(\sqrt{4\pi\epsilon_0})]^2 I_1 I_2 (l/r) = \mu I_1 I_2 l / (2\pi\epsilon_0 r); \\ [F] = A^2 \cdot \text{м} / \Phi = B \cdot A \cdot \text{м} / c = B \cdot A \cdot c \cdot \text{м} / c^2 = H \cdot \text{м}^2 / c^2,$$

что не является единицей силы.

Если случайно выполнить рационализацию формулы, соответствующей СИ (т. е. без рекомендованной предварительной проверки), то:

формулы, которые в системах СГС и СИ выглядят одинаково, не изменятся. Например, для закона Ома $R=U/I$ получим

$$4\pi\epsilon_0 R = \frac{\sqrt{4\pi\epsilon_0} U}{\frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} I} \text{ и вновь } R=U/I;$$

для механического момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле, $\vec{M}=[\vec{m}\vec{B}]$ получим

$$\vec{M} = \sqrt{\mu_0/(4\pi)} \vec{m} \sqrt{4\pi/\mu_0} \vec{B} = [\vec{m}\vec{B}];$$

формулы, которые в системах СГС и СИ выглядят различно, станут неверными. Так, подставляя переводные коэффициенты, приведенные в табл. 32, в формулу магнитного момента контура с током, отвечающую СИ, $\vec{m}=IS$, получим

$$\sqrt{(\mu_0/4\pi)} \vec{m} = (1/\sqrt{4\pi\epsilon_0}) IS; \quad \vec{m} = cIS$$

или

$$[\vec{m}] = (\text{м/с}) \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2 = \text{А} \cdot \text{м}^3/\text{с},$$

что ошибочно.

Иногда единицы СИ можно применять в уравнениях СГСМ-системы. Так, подстановка единиц СИ в формулу удельного заряда электрона e/m дает

$$\begin{aligned} [e/m] &= \text{В}/(\text{Тл}^2 \cdot \text{м}^2) = \text{В} \cdot \text{м}^2/\text{Вб}^2 = \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}^2) = \\ &= \text{А} \cdot \text{м}^2/(\frac{1}{10^9} \cdot \text{м} \cdot \text{с}) = \text{А} \cdot \text{с}/\text{кг} = \text{Кл}/\text{кг}. \end{aligned}$$

Нетрудно убедиться, что числовой результат будет также правилен, поскольку 1 СГСМ-ед. электрического напряжения = 10^{-8} В; 1 Гс = 10^{-4} Тл; 1 СГСМ-ед. электрического заряда = 10 Кл.

Однако это вовсе не распространяется на любые формулы, записанные в СГСМ-системе. Так, для силы взаимодействия токов — см. формулу (2) — получилось бы $[F]=\text{А}^2$, что неверно.

Рассмотренные примеры — хорошая иллюстрация к высказыванию известного физика и педагога Р. Фейнмана: «Имея дело с электромагнитными величинами, будьте осторожны!» (Л. 16).

§ 13. Единицы физических величин, относящихся к светотехнике

К промышленной фотометрии относится проверка рабочих характеристик газонаполненных, вакуумных или твердотельных приборов и устройств: осветительных (лампы накаливания, разрядные, люминесцентные); фоточувствительных (электронно-оптические преобразователи, передающие телевизионные трубки, фотоэлементы и фотоумножители); со светящимся изображением (кинескопы и другие электронно-лучевые трубки, знаковые газоразрядные индикаторы, флюоресцирующие панели, сцинтилляторы, жидкокристаллические элементы).

Методы квантовой электроники используются при создании и исследовании генераторов когерентного излучения, или лазеров (ОКГ). При этом работают с оптически активными средами (кристаллами, жидкостями); полупрозрачными и зеркальными пленками, световодами.

К лучевой технологии относятся:

фотолитографические процессы производства полупроводниковых приборов и твердотельных схем (локальная трафаретная микрообработка);

использование ОКГ в качестве инструмента острофокусированного энергетического воздействия (локальная лазерная микрообработка для сварки, получения трафаретов и др.).

Специфичные для светотехники физические величины и их единицы подразделяют на две подгруппы.

1. Собственно светотехнические (индекс v), которые отражают восприятие света человеческим глазом, поэтому в определенной мере субъективны, распространяются лишь на видимые излучения в узкой полосе электромагнитного спектра (примерно от 380 до 760 нм). В основе этой подгруппы лежит кандела — одна из основных единиц СИ, представляющая собой световой поток, приходящийся на единичный телесный угол.

Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600\,000\text{ м}^2$ полного излучателя в перпендикулярном направлении, при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па. Это определение было принято в 1948 г. Существовавший прежде эталон силы света —

Международная свеча — равна 1,005 кд. Применять какие-либо кратные и дольные канделы не рекомендуется.

2. Энергетические (индекс e), которые строятся на представлениях обычной механики, независимы от субъективных оценок и распространяются на весь диапазон электромагнитных частот, включая видимую область спектра. В основе этой подгруппы лежит ватт, который относится ко всему потоку излучения и равен отношению энергии ко времени. Поскольку в течение каждого периода электромагнитной волны поток излучения непостоянен, речь идет о его среднем значении за время, много большее данного периода. Световым аналогом ватта является не кандела, а производная от нее единица СИ — люмен ($\text{лм} = \text{кд} \cdot \text{ср}$).

Связь между единицами этих подгрупп осуществляется с помощью светового эквивалента излучения, или видности,

$$K = \Phi_v / \Phi_e,$$

где Φ_v — световой поток, а Φ_e — поток создающей его энергии.

Видность, как и все светотехнические величины, отчасти субъективна и ее числовое значение для разных людей усреднено. Для одного и того же человека видность зависит от длины волны, равняясь нулю в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра и достигая максимума примерно при 560 нм. Обычно полагают, что максимальная видность K_m равна 683 лм/Вт.

Кроме того, пользуются понятием относительной видности $V = K/K_m$, где K — абсолютная видность для данной длины волны λ (табл. 33).

Через видность можно связать понятия световой энергии Q_v и энергии излучения Q_e

$$Q_v = K Q_e.$$

Видность — нелинейная функция длины волны λ , поэтому вне области 380—760 нм световая энергия Q_v равняется нулю при любой энергии излучения Q_e .

Так как основная единица силы света — кандела установлена для определенного спектрального состава излучения (по эталону), к этому же составу излучения относятся все производные световые единицы. Переходить (например, при измерениях) к другому спектральному составу следует на основе значений относительной видности согласно ГОСТ 8.332—78.

Т а б л и ц а 33. Абсолютная и относительная видность

Длина волны λ , нм	Видность К, лм/Вт	Относительная видность V	Длина волны λ , нм	Видность К, лм/Вт	Относительная видность V
380	0,03	0,000 04	500	594	0,870
400	0,27	0,000 4	600	431	0,631
420	0,73	0,004	620	260	0,381
440	15,7	0,023	640	120	0,175
460	41,0	0,060	660	41,7	0,161
480	90,2	0,139	680	11,6	0,017
500	221	0,323	700	2,8	0,004 1
520	485	0,710	720	0,72	0,001 05
540	652	0,954	740	0,17	0,000 25
560	630	0,995	760	0,04	0,000 06

§ 14. Производные единицы физических величин, относящихся к светотехнике

Важнейшие производные единицы физических величин, относящихся к светотехнике, приведены в табл. 34.

Т а б л и ц а 34. Производные единицы СИ, относящиеся к светотехнике

Величина		Обозначения единиц СИ
наименование	символ	
Волновое число	—	м^{-1}
Световой поток	Φ_v	лм
Световая энергия	Q_v	лм · с
Светимость	M_v	лм/м ²
Освещенность	E_v	лк
Яркость	L_v	кд/м ²
Световая экспозиция	—	лк · с
Световой эквивалент потока излучения	K	лм/Вт

Величина		Обозначение единиц СИ
наименование	символ	
Энергетическая сила света, сила излучения	I_e	Вт/ср
Энергетическая светимость (излучательность)	M_e	Вт/м ²
Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	Вт/м ²
Энергетическая яркость (лучистость)	L_e	Вт/(ср·м ²)
Объемная плотность энергии излучения	ω	Дж/м ³
Спектральная плотность энергии излучения по длине волны	—	Дж/м
Спектральная плотность энергии излучения по частоте	—	Дж/Гц

Примечания: 1. Индексы v и e в буквенных обозначениях величин могут быть опущены, если это не ведет к недоразумениям. 2. Допускается применять комбинированную единицу световой энергии люмен·час (лм·ч), не входящую в единицы СИ.

Таблица 35. Перевод в СИ светотехнических единиц

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ
Светимость	радфот	—	10^4 лм/м ²
Освещенность	радлюкс	рлк	1 лм/м ²
Яркость	фот	фот, ф	10^4 лк
	стильб	сб, ст	10^4 кд/м ²
	ламберт	Лб	$3,18 \cdot 10^3$ кд/м ²
	нит	нт	1 кд/м ²
	апостильб	асб	0,318 кд/м ²

Примечания: 1. Единицы ламберт и апостильб относились к яркости несамосвещающегося ламбертова источника, т. е. поверхности, идеально рассеивающей свет по всем направлениям, совершенно его не поглощая. Их числовые значения получают путем деления на π стильба и нита. 2. В основе единиц стильб, ламберт и апостильб может лежать не кандела, а Международная свеча. В этом случае числа последнего столбца необходимо умножить на 1,005, что соответственно дает $1,005 \cdot 10^4$ кд/м², $3,20 \cdot 10^3$ кд/м² и 0,320 кд/м².

Переход к производным СИ от светотехнических единиц прежних систем можно выполнить с помощью табл. 35. Так как устаревшая единица силы света —

Международная свеча на 0,5 % отличается от канделы, при точных измерениях следует учитывать: 1 люмен (прежний) = 1,005 лм; 1 люкс (прежний) = 1,005 лк и т. д.

Перевод в СИ энергетических единиц излучения не имеет особенностей. Для СГС-единиц, основанных на эрге и квадратном сантиметре, с этой целью удобно использовать следующие соотношения: $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$; $1 \text{ эрг/см} = 10^{-5} \text{ Дж/м}$; $1 \text{ эрг/см}^2 = 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$; $1 \text{ эрг/см}^3 = 0,1 \text{ Дж/м}^3$; $1 \text{ эрг/с} = 10^{-7} \text{ Вт}$, а также табл. 28, где приведены внесистемные тепловые единицы. Следует учитывать, что единицы времени (секунда) и телесного угла (стерадиан) в СГС и СИ определены одинаково, поэтому, например, для энергетической яркости (лучистости) $1 \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^2) = 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Фундаментальные физические константы

Скорость света в вакууме

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Ускорение свободного падения

$$g = 9,806 \text{ 65 м/с}^2 \text{ (точно)}$$

Газовая постоянная

$$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

Молярный объем идеального газа при температуре 273,15 К и давлении 101325 Па *

$$V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$$

Постоянная Стефана — Больцмана

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Масса покоя электрона

$$m_e = 9,110 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Отношение массы протона к массе электрона

$$(m_p/m_e) = 1836$$

Постоянная Больцмана

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Заряд электрона

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Постоянная Планка

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Постоянная Авогадро

$$L = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

* При 300 К и 0,1 МПа $V_m = 24,94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Единицы физических величин. ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78). — М.: 1981.
2. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. — М.: Изд-во стандартов, 1980.
3. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263—70. М., 1972.
4. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» РД 50—160—79. — М.: Изд-во стандартов, 1979.
5. Словарь-справочник автора. — М.: Книга, 1979.
6. Справочная книга корректора и редактора/Под ред. А. Э. Мильчина. — М.: Книга, 1974.
7. Обозначения, единицы измерения и терминология в физике. «Успехи физических наук», 1979, т. 129, вып. 2, с. 290—335.
8. Граудина Л. К. и др. Грамматическая правильность русской речи. — М.: Наука, 1976.
9. Чертов А. Г. Единицы физических величин. — М.: Высшая школа, 1977.
10. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. — М.: Наука, 1977.
11. Базакуца В. А. Международная система единиц. — Харьков: изд-во Харьковского университета, 1973.
12. Беклемишев А. В. Меры и единицы физических величин. — М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963.
13. Богуславский М. Г. и др. Таблицы перевода единиц измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1963.
14. Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. — М.: Атомиздат, 1967.
15. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. — М.: Мир, 1980.
16. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. — М.: Мир, 1977, т. 5 и 6.
17. Иванов В. И. и др. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. — М.: Энергоиздат, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Глава первая. Физические величины. Единицы международной системы. Внесистемные единицы	7
§ 1. Физическая величина	7
§ 2. Определяющее уравнение. Пересчетные коэффициенты	10
§ 3. Номенклатура и применение единиц физических величин	14
§ 4. Наименование единиц физических величин	24
§ 5. Обозначение единиц физических величин	28
§ 6. Десятичные кратные и дольные единицы. Приставки	34
Глава вторая. Базовые единицы физических величин в электронной технике	37
§ 7. Единицы физических величин, относящихся к механике	38
§ 8. Единицы физических величин, относящихся к термодинамике	50
§ 9. Единицы физических величин, относящихся к электричеству и магнетизму	57
§ 10. Рационализация уравнений электромагнетизма	59
§ 11. Производные единицы физических величин электромагнетизма	67
§ 12. Применение единиц физических величин электромагнетизма	74
§ 13. Единицы физических величин, относящихся к светотехнике	80
§ 14. Производные единицы физических величин, относящихся к светотехнике	82
Приложение	85
Литература	86

Геральд Дмитриевич Глебов

**ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Научный редактор *С. В. Розанов*

Редактор *А. Ш. Долгова*

Художественный редактор *Т. В. Панина*

Художник *В. М. Боровков*

Технический редактор *Ю. А. Хорева*

Корректор *Г. А. Четкина*

ИБ № 3671

Изд. № ЭГ — 412. Сдано в набор 13.01.82. Подп. в печать 03.04.83. Т — 03769.
Формат 84×108/32 Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная Печать высокая
Объем 4,62 усл. печ. л. 4,83 усл. кр.-отт. 4,32 уч.-изд. л.
Тираж 40 000 экз. Зак. № 1112 Цена 10 коп.

Издательство «Высшая школа». Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Хохловский пер., 7

10 коп.