

Е. М. Аристов

ЕДИНИЦЫ
ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН

WG

VK

m

SIP_a



Е. М. АРИСТОВ

ЕДИНИЦЫ
ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН



ИЗДАТЕЛЬСТВО «СУДОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАД · 1972

Аристов Е. М.
 А81 Единицы физических величин. Л., «Судострое-
 ние», 1972.

96 с.

В книге рассмотрены принципы построения Международной системы единиц, даны определения единиц физических величин. Большое внимание уделено пояснениям их физической сущности.

Рассмотрение единиц СИ сопровождается примерами из практики расчетов и проектирования судов и их оборудования. Даны таблицы перевода единиц различных систем в единицы СИ и другой материал справочного характера.

Книга, отражающая новейшие достижения метрологии, предназначена для инженерно-технических работников судостроительной промышленности, а также для студентов кораблестроительных институтов и техникумов.

531.7

2-3
 83-72

ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ
 АРИСТОВ
**ЕДИНИЦЫ
 ФИЗИЧЕСКИХ
 ВЕЛИЧИН**

Рецензенты: докт. техн. наук проф. [Л. Л. Мясников],

докт. техн. наук проф. К. П. Широков

Редактор В. Е. Левтов

Художественный редактор И. Ф. Шакуро

Технический редактор Р. К. Чистякова

Корректор В. И. Морева

Оформление обложки художника Б. Н. Осенчакова

Сдано в набор 14 февраля 1972 г. Подписано к печати 9 ноября 1972 г. М-07561

Формат издания 84×108/32. Бумага типогр. № 3, Печ. л. 3, Усл. печ. л. 5,04,

Уч.-изд. л. 5,5. Тираж 35400. Зак. № 126. Цена 29 коп. Изд. № 2550-70.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8

Ордена Трудового Красного Знамени

Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой Главполиграфпрома

Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли. Измайловский проспект, 29.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Условные обозначения физических величин	7
Обозначения единиц физических величин	9
Введение	13
Глава 1. Современные системы единиц	17
§ 1. Историческая справка о развитии единиц	—
§ 2. Краткая история развития систем единиц	21
§ 3. Единицы физических величин, применяемые в СССР	27
Глава 2. Уравнения связи между физическими величинами и их единицами	32
§ 4. Размерности величин	—
§ 5. Форма математических выражений и единицы физических величин	36
§ 6. Рационализация уравнений электромагнитного поля	40
Глава 3. Международная система единиц	44
§ 7. Основные единицы	—
§ 8. Производные механические величины и их единицы	51
§ 9. Производные электрические и магнитные величины и их единицы	54
§ 10. Производные тепловые величины и их единицы	58
§ 11. Производные лучистые и световые величины оптического излучения и их единицы	61
§ 12. Производные акустические величины и их единицы	64
§ 13. Производные величины в области ионизирующих излучений и их единицы	66
Глава 4. Внесистемные единицы и единицы системы СГС, применяемые в науке и технике	68
§ 14. Кратные и дольные единицы	—
§ 15. Внесистемные единицы	70
§ 16. Единицы системы СГС	76
Приложения	82
Указатель литературы	95

ПРЕДИСЛОВИЕ

В создании современных судов, представляющих собой большой и сложный комплекс оборудования и конструкций, принимает участие громадный коллектив научных работников, инженеров, техников и рабочих судостроительных предприятий. Обширна и разнообразна техническая документация, необходимая для строительства и эксплуатации судов. Разнообразен характер работ, предшествующий и сопутствующий созданию судна, — это многочисленные исследования в области гидромеханики, строительной механики, электротехники, акустики, теплотехники, металлургии, технологии, экономики, охраны труда.

Большое значение в этих работах имеет оформление результатов расчетов и проектов, исследований, стендовых и натурных испытаний в виде чертежей, записок и различных нормативных документов. Не последнюю роль при их выполнении играют вид формул, наличие коэффициентов и переводных множителей, связанных с применением той или иной системы единиц физических величин.

Чтобы объединить расчеты в различных отраслях, неизбежны затраты времени и труда на пересчет, вызванный различием применяемых систем единиц. Даже в одной и той же отрасли техники нередко используют единицы различных систем. Например, при измерении давления наряду с единицей килограмм-сила на квадратный сантиметр применяют единицу миллиметр водяного и ртутного столба. До сих пор мощность первичного двигателя выражают в лошадиных силах, а установленного на его валу генератора — в киловаттах. Не всегда единицы соответствуют физической сущности величин. Например, расход материалов (топлива, воды и пр.) выражают в единицах силы, хотя следует применять единицы массы. Даже в учебниках нередко

встречается смешение таких понятий, как «точность» и «погрешность», «вес» и «масса», или применение термина «обороты вала» вместо «частота вращения вала», «регулирование оборотов» вместо «регулирование угловой скорости», «тарировка» вместо «градуировка», «замер» вместо «наблюдение при измерении».

Более 10 лет назад XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц (СИ), применение которой в ряде стран стало обязательным или факультативным. В Советском Союзе с 1961 г. согласно стандарту [34] единицы СИ рекомендованы как предпочтительные. Однако широкого использования до последнего времени в отечественном судостроении они еще не имеют. В судостроительной промышленности и кораблестроительных учебных заведениях этими единицами пользовались и пользуются главным образом электрики. Такое положение сложилось из-за многолетней привычки инженеров, техников и научных работников судостроения применять те единицы, на основе которых они получили свою подготовку. Это — метр, килограмм-сила, секунда (МКГСС), сантиметр, грамм, секунда (СГС) и многочисленные внесистемные единицы.

В последнее десятилетие в СССР издана обширная литература, посвященная единицам физических величин. Выход в свет таких капитальных трудов, как книги Л. А. Сена, Г. Д. Бурдуна, Н. В. Калашникова и Л. Р. Стоцкого, А. Г. Чертова, С. Ф. Маликова и Н. И. Тюрина, а также ряда работ К. П. Широкова, способствовал употреблению единиц СИ в научных трудах и технической литературе.

Важнейшее значение для внедрения этой системы в жизнь имеет документ [43], подготовленный Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР (Госстандартом СССР). Этот документ регламентирует единицы физических величин для обязательного их применения в СССР. Основными из них являются единицы СИ.

Применение систем единиц и терминологии в каждой отрасли имеет свои особенности.

Настоящая книга призвана помочь работникам судостроительной промышленности, студентам и аспирантам учебных заведений кораблестроительного профиля в ис-

пользовании научно обоснованных терминов, понятий и единиц физических величин.

Книга состоит из четырех глав и приложений, имеющих справочный характер. Для удобства пользования изложенным материалом в начале книги дан перечень условных обозначений физических величин и их единиц.

При составлении книги автору существенную помощь оказали докт. техн. наук проф. Л. Л. Мясников и докт. техн. наук проф. К. П. Широков. Автор выражает им глубокую благодарность.

Книга, возможно, не лишена недостатков. Автор будет признателен всем, кто сообщит свои замечания и советы, направленные на улучшение книги. Посылать отзывы автор просит по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

Автор

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- A — работа, активность излучения;
- a — расстояние, амплитуда колебаний, температуропроводность, ускорение линейное;
- B — магнитная индукция, яркость;
- \mathbf{B} — вектор магнитной индукции;
- c — скорость распространения акустических волн, удельная теплоемкость, активность изотопа, скорость света в вакууме;
- C — теплоемкость тела, электрическая емкость;
- C_p — теплоемкость при постоянном давлении;
- C_v — теплоемкость при постоянном объеме;
- D — доза излучения;
- \mathbf{D} — вектор электрического смещения;
- E — напряженность электрического поля, освещенность, электродвижущая сила, энергия, модуль упругости;
- \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля;
- E_{cp} — средняя энергия частицы или кванта, средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул;
- e — заряд электрона (иона);
- e_λ — мощность излучения, отнесенная к единичному интервалу;
- F — магнитодвижущая сила, постоянная Фарадея;
- f — частота периодического процесса;
- G — вес, сила тяжести, модуль сдвига, гравитационная постоянная;
- G_m — магнитная проводимость;
- g — ускорение свободного падения;
- H — напряженность магнитного поля, количество освещения;
- \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля;
- I — размерность силы тока и сила тока, полный ток, сила света;
- i — сила тока (мгновенное значение);
- J — размерность силы света, интенсивность намагничивания, интенсивность звука, мощность дозы (интенсивность) излучения, момент инерции (динамический), энтальпия;
- \mathbf{j} — вектор плотности тока проводимости;
- k — постоянная Больцмана, коэффициент теплопередачи;
- k_m — восприимчивость магнитная;
- L — размерность длины, длина, индуктивность, момент количества движения;
- l — длина;
- M — размерность массы, взаимная индуктивность, механический момент;
- m — масса, «магнитная масса»;

N — число Авогадро, число витков;
 n — показатель кратности (или дольности), частота вращения;
 P — сила, мощность, активная мощность, поляризованность;
 P_S — полная мощность;
 P_q — реактивная мощность;
 p_m — магнитный момент диполя;
 p_ε — электрический момент диполя;
 p — давление;
 Q — количество теплоты, количество электричества, реактивная мощность электрической цепи, заряд;
 q — заряд, удельная теплота;
 R — газовая постоянная, светность (светимость);
 R_m — магнитное сопротивление;
 r — расстояние, радиус, электрическое сопротивление (активное);
 S — площадь, энтропия, полная мощность электрической цепи;
 s — удельная энтропия;
 T — размерность времени, температура (абсолютная);
 t — время, температура;
 U — электрическое напряжение, внутренняя энергия;
 V — объем;
 v — скорость, средняя квадратическая скорость, удельный объем;
 W — энергия, световая энергия, момент сопротивления;
 x — реактивное сопротивление электрической цепи;
 y — полная проводимость электрической цепи;
 z — полное сопротивление электрической цепи;
 Z_a — акустическое сопротивление;
 Z_m — механическое сопротивление;
 α — коэффициент теплоотдачи;
 α_p — термический коэффициент давления;
 α_V — термический коэффициент объемного расширения;
 β — волновое число, коэффициент затухания;
 γ — удельный вес;
 δ — толщина диэлектрика, плотность тока;
 ε — угловое ускорение, диэлектрическая проницаемость, относительное удлинение;
 ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость;
 ε_0 — электрическая постоянная;
 η — динамическая вязкость;
 Θ — размерность температуры;
 λ — коэффициент теплопроводности, постоянная распада, длина волны;
 μ_a — абсолютная магнитная проницаемость;
 μ_0 — магнитная постоянная;
 μ — магнитная проницаемость;
 ν — кинематическая вязкость, частота;
 ξ — перемещение;
 ξ — колебательная скорость;
 ξ_V — объемная колебательная скорость;
 ρ — плотность, объемная плотность свободных зарядов, удельное сопротивление, плотность электрического заряда поверхностная, касательное напряжение;

σ — удельная проводимость, нормальное напряжение;
 τ — период;
 Φ — магнитный поток, световой поток;
 Φ_T — тепловой поток;
 Φ_ε — поток излучения;
 φ — угол;
 Φ_T — поверхностная плотность теплового потока;
 Ψ — полный магнитный поток;
 Ψ_D — поток электрического смещения;
 ω — угловая скорость;
 Ω — телесный угол.

ОБОЗНАЧЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Единица	Обозначение	
	международное	русское
СИ:		
метр	m	м
килограмм	kg	кг
секунда	s	с
ампер	A	А
кельвин	K	К
кандела	kd	кд
моль	mol	моль
радиан	rad	рад
стерадиан	sr	ср
квадратный метр	m ²	м ²
кубический метр	m ³	м ³
метр в минус первой степени	m ⁻¹	м ⁻¹
метр в секунду	m/s	м/с
метр на секунду в квадрате	m/s ²	м/с ²
герц	Hz	Гц
секунда в минус первой степени	s ⁻¹	с ⁻¹
радиан в секунду	rad/s	рад/с
радиан на секунду в квадрате	rad/s ²	рад/с ²
килограмм на кубический метр	kg/m ³	кг/м ³
кубический метр на килограмм	m ³ /kg	м ³ /кг
килограмм-метр в квадрате	kg · m ²	кг · м ²
метр в четвертой степени	m ⁴	м ⁴
килограмм-метр в секунду	kg · m/s	кг · м/с
килограмм-метр в квадрате в секунду	kg · m ² /s	кг · м ² /с
ньютон	N	Н
ньютон-метр	N · m	Н · м
ньютон-секунда	N · s	Н · с
паскаль	Pa	Па

Единица	Обозначение	
	международное	русское
джоуль	J	Дж
ватт	W	Вт
паскаль-секунда	Pa · s	Па · с
квадратный метр на секунду	m ² /s	м ² /с
кубический метр в секунду	m ³ /s	м ³ /с
ампер на метр	A/m	А/м
ампер на квадратный метр	A/m ²	А/м ²
кулон	C	Кл
кулон на квадратный метр	C/m ²	Кл/м ²
кулон на кубический метр	C/m ³	Кл/м ³
кулон-метр	C · m	Кл · м
вольт	V	В
вольт на метр	V/m	В/м
фарада	F	Ф
ом	Ω	Ом
ом-метр	Ω · m	Ом · м
сименс	S	См
сименс на метр	S/m	См/м
вебер	Wb	Вб
тесла	T	Т
генри	H	Г
генри на метр	H/m	Г/м
ампер на вебер	A/Wb	А/Вб
вар	var	вар
вольт-ампер	V · A	В · А
джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг
джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg · K)	Дж/(кг · К)
ватт на квадратный метр-кельвин	W/(m ² · K)	Вт/(м ² · К)
кельвин в минус первой степени	K ⁻¹	К ⁻¹
кельвин на метр	K/m	К/м
люмен	lm	лм
люмен-секунда	lm · s	лм · с
люкс	lx	лк
люмен на квадратный метр	lm/m ²	лм/м ²
кандела на квадратный метр	cd/m ²	кд/м ²
люкс-секунда	lx · s	лк · с
люмен на ватт	lm/W	лм/Вт
ватт настерадиан	W/sr	Вт/ср
джоуль на метр	J/m	Дж/м
джоуль на герц	J/Hz	Дж/Гц
паскаль-секунда на кубический метр	Pa · s/m ³	Па · с/м ³
паскаль-секунда на метр	Pa · s/m	Па · с/м

Единица	Обозначение	
	международное	русское
джоуль на кубический метр	J/m ³	Дж/м ³
джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг
ватт на килограмм	W/kg	Вт/кг
кулон на килограмм	C/kg	Кл/кг
СГС:		
дина	dyn	дин
эрг	erg	эрг
максвелл	Mx	Мкс
гаусс	Gs	Гс
эрстед	Oe	Э
гильберт	Gb	Гб
пуаз	P	П
стокс	St	Ст
Внесистемные:		
минута	min	мин
час	h	ч
сутки	d	сут
неделя	—	нед
месяц	—	мес
год	a	год
градус Цельсия	°C	°C
прямой угол	└ ^o	└ ^o
градус	... ^o	... ^o
минута	... [']	... [']
секунда	... ["]	... ["]
гон	g ^o	гон
градус в квадрате	□ ^o	□ ^o
гектар	ha	га
литр	l	л
узел	kn	уз
километр в час	km/h	км/ч
оборот в секунду	—	об/с
оборот в минуту	—	об/мин
ангстрем	Å	Å
карат	ct	кар
киловатт-час	kW · h	кВт · ч
ампер-час	A · h	А · ч
электронвольт	eV	эВ
килоэлектронвольт	keV	кэВ
мегаэлектронвольт	MeV	МэВ
децибел	dB	дБ
непер	Np	Нп

Единица	Обозначение	
	международное	русское
фон	—	фон
бит	bit	бит
распад в секунду	—	расп./с
альфа-частица в секунду на квадратный метр	$\alpha/(s \cdot m^2)$	альфа-част./ $(с \cdot м^2)$
бета-частица в секунду на квадратный метр	$\beta/(s \cdot m^2)$	бета-част./ $(с \cdot м^2)$
нейтрон в секунду на квадратный метр	$n/(s \cdot m^2)$	нейтр./ $(с \cdot м^2)$
процент	%	%
промилле	‰	‰
миллионная доля	ppm	млн ⁻¹
килограмм-сила	kgf	кгс
грамм-сила	gf	гс
тонна-сила	tf	тс
килограмм-сила-метр	kgf · m	кгс · м
лошадиная сила	—	л. с.
калория	cal	кал
килокалория	kcal	ккал
миллиметр ртутного столба	mm Hg	мм рт. ст.
миллиметр водяного столба	mm H ₂ O	мм вод. ст.
бар	bar	бар
калория в секунду на квадратный сантиметр	$cal/(s \cdot cm^2)$	ккал/ $(с \cdot см^2)$
калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия	$cal/(s \cdot cm \cdot ^\circ C)$	кал/ $(с \cdot см \cdot ^\circ C)$
бэр в секунду	rem/s	бэр/с
рентген	R	Р
кюри	Ci	Ки
рентген в секунду	R/s	Р/с

Физическая величина. Употребление этого термина в литературе не всегда соответствует его смыслу. Нередко под величиной подразумевают числовое значение, количество. Например, можно встретить такие выражения: «величина тока была равна x ампер», «величина скорости составляла y метров в секунду». Однако величина имеет смысл не только числа или количества. В науке понятию «величина» придается смысл характеристики измеримых свойств объектов материального мира.

Как известно, между свойствами объектов материального мира существуют закономерные связи, которые выражены зависимостями между величинами, характеризующими эти объекты, т. е. между характеристиками явлений, процессов и свойств, поддающимися количественной оценке. Многие из этих связей можно представить в виде математических уравнений и, следовательно, изобразить величины в виде некоторых символов этих уравнений. Таковы, например, математические выражения законов всемирного тяготения, взаимодействия между токами, термического расширения идеальных газов*.

Физические величины, образующие уравнения, выражают некоторую сущность понятий, название которых они носят. Термин «ток», или «сила тока», определяет интенсивность движения электронов, термин «температура» — интенсивность движения молекул, термины «протяженность», «площадь» и «объем» выражают некоторые пространственные представления.

* Физическая величина — свойство общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта [30].

Таким образом, физические величины имеют конкретный смысл измеримых характеристик материальных объектов и образуют стройную систему научных представлений о них. Открытия физики сопровождались разработкой новых концепций и идей, объясняющих разнообразные явления материального мира. Вполне естественно, что в связи с этим возникали новые понятия и новые физические величины. Число физических величин в настоящее время весьма велико, но все они могут быть выражены в виде некоторого количества условно принятых единиц [30].

Единица физической величины. Количественное сравнение физических величин невозможно, если не существует какого-то общего количественного критерия — исходной величины, одинаковой (однородной) по своей природе с рассматриваемой величиной. Для оценки протяженности надо выбрать некоторую исходную протяженность, для оценки тока — исходную силу тока. Физическая величина может иметь множество реализаций. Избрав некоторую частную реализацию физической величины за «масштаб» оценки, за некоторую «меру», легко выразить любые реализации этой величины в виде количества. Частную реализацию величины с числовым значением, равным 1, называют единицей физической величины.

Размер величины представляет собой количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Так, метр представляет собой некоторую вполне определенную длину, ом — некоторое вполне определенное сопротивление. Чем больше единица, тем больше ее размер.

Значение физической величины есть ее оценка в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Следовательно, любую физическую величину можно выразить в виде некоторого числа n единиц этой величины. Такое отвлеченное число n называют числовым (численным) значением величины. Значение n зависит от размера единицы данной величины.

Пусть единицей длины является некоторая протяженность l , равная одному метру. Если расстояние l_1 равно n метров, то числовое значение величины $n = l_1/l$. Следовательно, числовое значение величины n обратно пропорционально ее единице. Во многих случаях слово «значение» можно опустить и говорить о величине, на-

зывая ее единицу и число единиц, например, ток равен $\{I\}$ ампер, сила достигла $\{F\}$ ньютонов.

Любую физическую величину x можно представить в виде $x = \{x\}[x]$, где $\{x\}$ — число единиц; $[x]$ — единица величины. Физические величины, отличающиеся друг от друга только количественно, т. е. числовым значением, называются однородными. Конечно, для измерения однородных величин можно применять различные по размеру единицы. Так, длину можно выражать в метрах, сантиметрах и других единицах. От выбора единицы $[x]$ изменится только количество $\{x\}$.

Измерение. Рассмотренные понятия не имели бы практического смысла, если бы физические величины невозможно было определить экспериментально, что является целью и сущностью измерений. Измерение есть нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств [30].

Информация, получаемая посредством измерений, отличается от информации, полученной другим способом, например с помощью чисто математических операций.

Виды и методы измерений разнообразны. Они зависят как от самих измеряемых величин и свойств объектов измерений, так и от требований к результатам измерений [28].

Существенное значение в измерениях принадлежит техническим средствам, с помощью которых выполняют измерения. Важнейшими из этих средств являются меры и измерительные приборы. Мерой называют средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины данного размера, а измерительным прибором — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Мерами являются гири, магазины сопротивлений, емкостей и индуктивностей и т. п. [30].

Измерительные приборы разнообразны как по виду своих показаний (цифровые, аналоговые), так и по способу выражения результатов измерения (показывающие, регистрирующие, суммирующие, интегрирующие). К группе измерительных приборов относят часы, амперметры, манометры, счетчики и т. п.

Важнейшая оценка качества измерений — их погрешность представляет собой отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Точность измерений отражает близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Например, точность равна 100, если относительная погрешность составляет 0,01.

Особую группу средств измерений составляют образцовые меры и измерительные приборы, служащие для поверки по ним других средств измерений. Наивысшей точностью обладают так называемые эталоны единиц, которые представляют собой средства измерений, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц с целью передачи их размера другим средствам измерений.

Г Л А В А 1. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

§ 1.

Историческая справка о развитии единиц

Измерение возникло на ранней ступени развития материальной культуры человечества. Вначале оценка внешних явлений носила лишь качественный характер («меньше — больше»), а в дальнейшем эта оценка приобрела и количественную форму («во сколько раз»). Первые единицы и меры служили для определения времени и протяженности.

Долгое время в практике применялось ограниченное количество физических величин. В Древней Греции, Риме и Египте пользовались лишь единицами длины, площади, времени, веса, объема. Единицы измерений в этот период истории носили местный характер [5, 16].

Феодальный строй внес мало изменений в номенклатуру физических величин, использовавшихся в практике и науке. Слабый обмен, характерный для этой фазы развития общества, привел лишь к образованию многочисленных единиц одних и тех же величин. Многие города в Голландии, Германии, Северной Италии, отдельные общины Франции имели самостоятельные единицы. Разнообразие единиц характерно и для феодального периода Руси, когда существовало несколько видов сажени, версты, десятины и т. д.

Неоднократные попытки узаконить и унифицировать единицы не приводили к каким-либо заметным результатам вплоть до конца XVIII в. Экономические условия для унификации единиц были созданы промышленной революцией, развитием капиталистического способа производства. В этот период начинают устанавливать единые единицы в масштабе национального государства.

В 1791 г. по предложению Французской Академии наук Национальное собрание Франции постановило принять в качестве основной единицы длины одну десяти-миллионную часть четверти дуги Парижского меридиана, названную метром, а в качестве единицы массы — массу одного кубического дециметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности 4°C , названную килограммом.

На основании измерений длины дуги меридиана и лабораторных работ по измерению массы кубического дециметра воды были изготовлены платиновые эталоны метра и килограмма. По представлению Лапласа Национальное собрание Франции утвердило их декретом от 10 декабря 1799 г. Первые образцы (прототипы) метра и килограмма были переданы для хранения в Национальный архив Франции и получили название «архивных».

Одновременно с единицами длины были разработаны единицы площади и объема и установлена кратность 10^n (где n — целое число, отличное от нуля) для перехода к более крупным и более мелким единицам этих величин.

Метрическая система мер была первой в истории, использующей характерный признак природы. Однако в дальнейшем пришлось отказаться от определения метра и килограмма по этому признаку, так как точные вычисления, произведенные уже после изготовления архивных образцов метра и килограмма, показали некоторое несоответствие этих единиц их определению: метр оказался немного меньше ($1/4 \cdot 10^7$) длины дуги Парижского меридиана, а объем массы воды в один килограмм — несколько больше одного кубического дециметра.

Десятичный принцип построения метрической системы является ее существенным преимуществом, оказавшим в дальнейшем большое влияние на распространение этой системы. Этот принцип построения был также использован для образования кратных и дольных единиц в современной метрологии.

Международное распространение метрической системы мер получила во второй половине XIX в. В мае 1875 г. семнадцать государств, в том числе и Россия, подписали Метрическую конвенцию. Метрическая конвенция имела в виду установить международные прототипы метра и килограмма, а также создать между-

народные организации (Международный комитет мер и весов, Международное бюро мер и весов) и периодически проводить Генеральные конференции по мерам и весам для изучения вопросов, связанных с применением метрической системы.

В 1889 г. были закончены изготовление и сличение серий эталонов метра и килограмма из сплава платины с иридием. Их международные прототипы были переданы в Международное бюро мер и весов (Париж) на хранение, а остальные эталоны распределены между странами — участницами Метрической конвенции. Однако далеко не все участники этой конвенции ввели в своих странах метрическую систему мер. Такие крупные промышленные страны, как США и Англия, сохранили свои национальные системы единиц длины и массы даже до настоящего времени. Некоторые единицы длины и массы в этих странах с одним и тем же названием (миля, фунт) имеют различный размер.

Метрическая система образовалась как совокупность ограниченного числа единиц и мер, воспроизводящих две единицы — длины и массы. С современной точки зрения метрическая система не является системой единиц физических величин, поскольку она не охватывает широкую совокупность физических величин. В метрическую систему входят кратные и дольные единицы, образованные по десятичному принципу по отношению к исходным единицам. Название «метрическая система мер» точнее отвечает сущности этой совокупности.

Метрическая система мер встретила активную поддержку ученых дореволюционной России, которые сыграли видную роль в работе международных метрологических организаций. Российская Академия наук предложила создать международную комиссию для изготовления прототипов единиц длины и массы. Законом 1899 г. метрическая система мер в России была допущена в качестве факультативной. В народное хозяйство метрическая система мер на территории России была внедрена лишь после Великой Октябрьской социалистической революции.

Декретом Совета Народных Комиссаров от 14 сентября 1918 г. предусматривалось:

1) взять за основу всех измерений метрическую систему мер и весов с десятичными подразделениями и производными;

2) за образцы основных единиц этой системы принять копию международного метра, носящую знак № 28, и копию международного килограмма, имеющую знак № 12;

3) обязать все советские учреждения и организации с 1 января 1919 г. приступить к введению международной метрической системы.

В настоящее время свыше 100 стран мира приняли для обязательного применения метрическую систему мер. Среди них все социалистические страны, а также такие развивающиеся страны, как АРЕ (1951), Иордания (1953), Индия (1956), Ливия (1957) и др.

В ряде капиталистических стран (Австралия, Англия, Ирландия, Канада, США) метрическая система допущена в качестве факультативной. Англия предполагает перейти на метрическую систему к 1975 г.

Значительно сложнее оказалась задача установления единой международной системы единиц физических величин.

Системой единиц следует называть совокупность единиц основных и производных величин, построенную по принципу соответствия связей между величинами, с одной стороны, и единицами — с другой. В настоящее время в метрологию вошло понятие «система физических величин» [43]. Этим термином обозначают совокупность физических величин, связанных между собой зависимостями.

До Галилея и Ньютона человечество использовало весьма ограниченную номенклатуру физических величин (геометрические величины, время, вес). В XVI—XVIII вв. появились новые величины. Так, открытие законов механики, теплоты и электричества повлекло за собой появление таких величин, как ускорение, масса, сила, работа, мощность, температура, электрический заряд и т. д. Вместе с этими величинами возникли и их единицы.

В XVII—XVIII вв. международный контакт ученых только складывался. Поэтому образование единиц в значительной степени зависело от инициативы и взглядов отдельных ученых. Так возникли различные температурные шкалы и различные единицы некоторых величин. Позднее эти единицы и шкалы приобрели даже национальный характер (например, шкала Фаренгейта

в США). Длительное время единицы различных физических величин не имели между собой связи. Идея объединения единиц в системы появилась лишь в XIX в. К этому времени было завершено развитие классической механики и на экспериментальной основе сформулированы законы электромагнетизма. Открытие закона сохранения энергии также явилось важнейшей предпосылкой для создания систем единиц в современном представлении.

§ 2.

Краткая история развития систем единиц

Система единиц физических величин представляет собой их совокупность, построенную по определенному принципу, устанавливающему связь единиц между собой. Впервые этот принцип предложил немецкий ученый Карл Гаусс (1777—1855). В работе «Напряжение земной магнитной силы, приведенной к абсолютной мере» (1832 г.) Гаусс сформулировал метод определения напряженности магнитного поля в различных точках Земли и предложил идею классификации единиц физических величин, приняв некоторые из них за независимые [24].

Основными единицами, по предложению Гаусса, следует считать такие, размер которых не зависит от размеров единиц других физических величин, т. е. размер основных единиц можно выбирать произвольно. В действительности же выбор размера основных единиц обусловлен рядом практических соображений, изложенных ниже.

Вторая группа единиц, названная Гауссом производными, образуется из физических зависимостей между величинами, выражаемыми в этих единицах, и величинами, единицы которых относятся к независимым или другим производным.

Такой принцип построения системы единиц вытекает из закономерных связей между физическими величинами, изображаемых математическими уравнениями. Таким образом, метод Гаусса связывает единицы физических величин уравнениями, выражающими физические законы.

Гауссом была выведена формула, в которой напряженность земного магнитного поля, исходя из закона Кулона о взаимодействии магнитных полюсов, выражается через длину, массу и время. Единицы этих трех величин Гаусс предложил считать основными. Систему единиц, в которой основными являются единицы длины, массы и времени, он назвал абсолютной. По методу Гаусса число производных единиц N должно быть равно числу независимых друг от друга уравнений связи между самими величинами. Например, если число основных единиц принято равным M , то при N независимых уравнениях величин общая совокупность будет состоять из $M+N$ единиц. Независимые уравнения должны быть совместными, а их форма — алгебраической.

В классической механике существуют три независимых уравнения, связывающие шесть механических величин: массу m , силу F , длину l , время t , работу A и гравитационную постоянную G , а именно:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{l^2}; \quad F = m \frac{l}{t^2}; \quad A = Fl \cos \alpha.$$

Следовательно, если в качестве основных выбрать единицы длины, массы и времени, то производными окажутся единицы гравитационной постоянной G , силы F и работы A .

Выбор основных единиц произволен, но необходимо соблюдать следующие условия, определяющие этот выбор.

1. Величины, единицы которых выбраны основными, должны выражать наиболее общие формы существования материи (например, массу, пространство, время).

2. Единицы должны быть воспроизведены с наивысшей для современной науки точностью, одинаковой для любого места и времени.

3. Метод воспроизведения основных единиц должен быть принят в международной практике.

4. Размер основных и производных единиц должен быть удобен для практического использования.

5. Уравнения, определяющие производные единицы, не должны содержать числовые коэффициенты, отличающиеся от единицы.

Основными единицами длины Гаусс предложил считать миллиметр, массы — миллиграмм, времени — секунду. Немецкий физик Вебер (1804—1891) использо-

вал метод Гаусса применительно к электрическим величинам.

Большой вклад в развитие систем единиц был внесен в конце XIX в. Комитетом по электрическим эталонам Британской Ассоциации для развития наук. Этот Комитет принял в качестве основных единиц сантиметр, грамм и секунду, на основе которых была создана абсолютная система единиц СГС, сохранившая свое значение до настоящего времени. Кроме того, Комитет создал электрическую систему единиц, основанную на законе взаимодействия электрических зарядов, и электромагнитную, базирующуюся на эффекте взаимодействия между током и магнитным полюсом. Основными единицами в обеих системах приняты сантиметр, грамм, секунда. В дальнейшем на базе этих систем была разработана применяемая до сих пор в физике симметричная система, или система Гаусса, охватывающая электрические и магнитные единицы СГС.

Со второй половины XIX в. работы по созданию систем единиц физических величин, эталонов единиц и определению размера единиц приобрели международный характер. Периодически стали созываться международные конгрессы и конференции, организовываться постоянно действующие комитеты и комиссии. В настоящее время к числу наиболее авторитетных международных метрологических учреждений и форумов относятся:

Генеральные конференции по мерам и весам, первая из которых состоялась в 1889 г., последняя (XIV) — в 1971 г. Основное направление работы конференций — принятие решений по применению систем единиц, способ их воспроизведения и по утверждению эталонов.

Международный комитет мер и весов, выполняющий функции исполнительного органа Генеральных конференций и реализующий их решения. В комитет входят Международное бюро мер и весов с лабораториями и консультативные комитеты. Комитет мер и весов состоит из представителей 18 стран и собирается один раз в два года.

Международная электротехническая комиссия (МЭК), комитет № 24 которой занимается разработкой электрических и магнитных систем единиц и правил их применения. Этот комитет МЭК принял рекомендации о рационализации уравнений электромагнитного поля; комитет № 1 предложил по рекомендации итальянского

физика Джорджи дополнить систему МКС четвертой основной электрической единицей — ампером.

Международный союз чистой и прикладной физики, специальная комиссия которого проводит работу по унификации обозначений, определений и терминологии, а также единиц физических величин и их систем. Резолюции этого союза обсуждаются на Генеральных конференциях по мерам и весам.

Комитет № 12 Международной организации по стандартизации (ИСО), утверждающий международные соглашения и принимающий рекомендации по величинам, единицам величин и их обозначениям. Работа ИСО основывается на решениях Генеральных конференций мер и весов.

Совет Экономической Взаимопомощи (СЭВ), выполняющий работы по согласованию применения систем единиц в социалистических странах.

Как видно, в настоящее время единицами физических величин и их системами занимается большой круг физиков и метрологов многих стран мира.

В Советском Союзе работы в области единиц физических величин и их систем ведет ряд научно-исследовательских институтов.

Наиболее крупным метрологическим учреждением Союза ССР является *Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ)*. Этот институт преобразован из Главной Палаты мер и весов, основанной великим русским ученым Д. И. Менделеевым в 1893 г. Во ВНИИМе разрабатываются, создаются и хранятся государственные эталоны единиц физических величин, разрабатываются методы точных измерений. Обширна тематика научно-исследовательских работ института. К их числу относятся исследования по определению физических констант, характеристик веществ и материалов.

Научные работы ВНИИМа в области измерений охватывают большую группу физических величин: механических, оптических, акустических, магнитных, электрических, ионизирующих излучений, тепловых и радиотехнических. Институт выполняет работы по созданию государственных стандартов на единицы физических величин и другие объекты метрологии. Ученые ВНИИМа

участвуют в международных организациях по метрологии и измерительной технике.

Важные задачи в области метрологии решают: *Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)*, возглавляющий Государственную Службу времени и разрабатывающий эталоны времени и частоты, а также являющийся центральным научным учреждением СССР в области точных радиотехнических, акустических, низкотемпературных измерений и измерений высоких давлений; *Всесоюзный научно-исследовательский институт Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР (ВНИИГК)* — головная организация в области прикладной метрологии.

Метрологическую службу в стране возглавляет Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР (Госстандарт СССР).

Существенное влияние на развитие метрологической науки оказали работы М. Ф. Романовой, Б. М. Яновского, А. К. Колосова, Е. Г. Шрамкова, Г. Д. Бурдуна, В. О. Арутюнова, П. М. Тиходеева, К. П. Широкова, Н. И. Тюрина, М. Ф. Маликова, П. Н. Агалецкого, С. В. Горбацевича, Б. Н. Олейника.

Главным итогом работы международных и национальных метрологических организаций явилось создание единой унифицированной системы единиц с семью основными единицами.

В октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила эту систему единиц и присвоила ей наименование «Международная система единиц» («Système International»), сокращенно «СИ» («SI»).

В разных странах мира наибольшее распространение получили следующие системы.

Абсолютные (это название в настоящее время не признается соответствующим существу систем, основанных на единицах длины, массы и времени):

СГС (сантиметр, грамм, секунда), применяемая в физике, астрономии, акустике;

МКС (метр, килограмм, секунда), применяемая в технике и прикладных науках. При добавлении к трем основным единицам четвертой она образует системы МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер), МКСГ (метр, килограмм, секунда, градус) и МКСС (метр, килограмм,

секунда, свеча). Системе МКСА в 1935 г. комитетом № 24 МЭК присвоено название системы Джорджи;

МТС (метр, тонна, секунда), применяемая в технической механике;

Международная система единиц (СИ) с семью основными единицами (метр, килограмм, секунда, кельвин, ампер, кандела, моль), являющаяся наиболее совершенной системой из абсолютных;

электрические и магнитные системы СГСЭ — электростатическая (электрическая постоянная $\epsilon_0 = 1$ — величина безразмерная), СГСМ — электромагнитная (магнитная постоянная $\mu_0 = 1$ — величина безразмерная), Гауссова симметричная система СГС ($\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$ — величины безразмерные). Системы СГСЭ и СГСМ применяют в экспериментальной физике, а симметричную СГС — в теоретической физике.

Кроме этих систем в литературе употребляют варианты систем электрических и электромагнитных единиц: СГС ϵ_0 и СГС μ_0 (системы с четвертой основной единицей — электрической ϵ_0 и магнитной μ_0 постоянными); СГСФ (сантиметр, грамм, секунда, франклин), в которой франклин — единица заряда; СГСБ (сантиметр, грамм, секунда, био), в которой био — единица силы тока. Эти варианты систем не получили широкого применения.

Техническая система МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда). Эта система, созданная на базе метрической системы, нашла широкое применение в технике и прикладных науках. В Советском Союзе ее используют до последнего времени, как правило, в учебной и технической литературе. В ближайшие годы предусмотрено изъять эту систему из применения в СССР.

В расчетах и исследованиях нередко применяется сочетание единиц МКС или СГС с внесистемной единицей количества теплоты калорией (как правило, в теплотехнике, термодинамике, физике, физической химии и промышленной практике). В этом сочетании наряду с единицей времени секундой применяется и внесистемная единица час. Совокупности этих единиц также намечено изъять из применения.

Среди многочисленных систем единиц особое место занимают когерентные, т. е. согласованные, системы. Отличительный признак этих систем — образование уравнений для определения производных единиц из уравнений для соответствующих величин с числовыми коэффициентами, равными единице, т. е. в когерентных системах уравнения для числовых значений величин полностью совпадают по форме с уравнениями для величин.

Например, уравнениям мощности $P = A/t$ и потенциальной энергии электрического поля $A = Ct^2/2$ соответствуют следующие уравнения числовых значений:

$$\{P\} = \frac{\{A\}}{\{t\}} \quad \text{и} \quad \{A\} = \frac{\{C\}\{U^2\}}{2}.$$

К когерентным принадлежат системы СГС и СИ, СГСЭ и СГСМ.

§ 3.

Единицы физических величин, применяемые в СССР

Основным документом, определяющим номенклатуру, наименование, обозначение и порядок применения единиц физических величин в Советском Союзе, является государственный стандарт, отражающий современный уровень развития науки и техники. Стандартизация единиц физических величин в СССР проводится с конца двадцатых годов. От стандартизации единиц, начатой еще до Великой Отечественной войны, наши метрологические организации перешли к созданию стандартов на системы единиц для отдельных отраслей и, наконец, к созданию единого стандарта на единицы физических величин.

До последнего времени действовали приведенные ниже стандарты.

ГОСТ «Механические единицы» [35] регламентирует системы единиц, а также внесистемные единицы механических величин. Этот стандарт допускает применение трех систем единиц: МКС, СГС и МКГСС. В более поздних документах наметилась тенденция к отказу от применения системы МКГСС, несмотря на то, что эта система получила широкое распространение.

Основанием для отказа от дальнейшего применения системы МКГСС послужили следующие причины:

1) основная единица этой системы — килограмм-сила — определяется по силе притяжения тела массой 1 кг к Земле при нормальном ускорении свободного падения. Передача этой силы осуществляется посредством пружинных динамометров, точность которых не отвечает современным требованиям (погрешность порядка 10^{-3}). Единица массы (кг \cdot с 2 /м) определяется как производная от единицы силы. Если бы гири проверя-

лись на пружинных весах, погрешность определения массы и силы оказалась бы недопустимо высокой;

2) сила земного притяжения зависит от положения массы по отношению к Земле (географической широты и высоты по отношению к уровню моря);

3) в системе МКГСС единица массы является производной и неудобной для практики, так как если за единицу ускорения принять 1 м/с^2 , то единица массы станет равной $9,80665 \text{ кг}$. Если, как это обычно делается, в качестве единицы массы принять единицу из системы МКС (1 кг), то единица силы (1 кгс) окажется пропорциональной единице массы (1 кг), умноженной на $9,80665$;

4) системы тепловых и электрических единиц могут быть связаны с системой МКГСС только при помощи переводных коэффициентов, что усложняет расчеты и совместное использование этих единиц в практике.

ГОСТ «Тепловые единицы» [40] в качестве основных единиц допускает метр, килограмм, секунду, градус Кельвина в совокупности с единицами, производными от калории.

Несмотря на то что современная литература по теплотехнике построена на единице количества теплоты калории, применение этой единицы также создает ряд затруднений, из-за того что она не связана с другими энергетическими единицами. Поэтому во всех формулах, где наряду с тепловыми фигурируют механические и электрические единицы, неизбежны переводные коэффициенты (например, международная калория равна $4,1868 \text{ Дж}$).

ГОСТ «Электрические и магнитные единицы» [41] допускает к применению систему МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер) и симметричную систему Гаусса. Применение симметричной системы Гаусса в настоящее время ограничено теоретическими разделами физики.

ГОСТ «Единицы системы МКСС» вошел в документ [39]. Однако теперь наименование основной единицы силы света изменено: вместо «свеча» введено международное наименование «кандела».

ГОСТ «Акустические единицы» [29] предусматривает наравне с единицами системы МКС применение единиц системы СГС.

ГОСТ «Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений» [32] устанавливает вместе с внесистемными

единицами излучений применение единиц СИ. (Последние два ГОСТа сохраняли свое действие до 1970 г.).

ГОСТ «Образование кратных и дольных единиц измерений» [38] сохранен в документе [43].

Проект ГОСТ «Единицы физических величин» [43] явился первым в отечественной и мировой литературе документом, обобщившим труд метрологов СССР по стандартизации единиц и их систем. В этом документе даны определения единиц, их наименования, правила применения размерности величин и другие сведения, необходимые для его практической реализации. Все единицы документ разделяет на пять групп: 1) важнейшие единицы СИ; 2) единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ; 3) единицы системы СГС, имеющие собственные наименования, и другие важнейшие единицы, применяемые в специальных разделах физики и в астрономии; 4) единицы, временно допускаемые к применению; 5) кратные и дольные единицы. Кроме того, разрешено применение некоторых единиц в отдельных областях техники.

Ниже приведены некоторые преимущества единиц СИ, важные для научных исследований и технического применения.

1. Когерентность. Так как уравнения для числовых значений величин в когерентных системах совпадают по форме с уравнениями для соответствующих физических величин, то из расчетов исчезнут все переводные коэффициенты, обусловленные выбором единиц. Ввиду того, что документ [43] допускает наравне с единицами СИ некоторые внесистемные единицы, в некоторых случаях коэффициенты сохраняются. Например, в судостроительной литературе сохраняются внесистемные единицы: времени (час, минута), угла (градус, минута, секунда), скорости (километр в час, узел), работы (киловатт-час), массы (тонна), длины (миля).

С целью наилучшего использования преимуществ когерентных единиц рекомендуется по возможности избегать применения внесистемных единиц. В частности, следует расход веществ, удельный расход и некоторые другие величины относить к единице времени секунде.

Многие отрасли техники (механика, теплотехника, ядерная техника и т. п.) до последнего времени имели

свои специфические единицы, что вызывало появление переводных коэффициентов.

Указанное свойство единиц снизит трудоемкость проектных и расчетных работ.

2. Универсальность. Единицы СИ охватывают все отрасли науки и техники, и, следовательно, этими единицами удобно пользоваться в любых технических расчетах и научных исследованиях. Кроме того, однородные величины, например работа, энергия, количество теплоты, энтальпия, в СИ выражаются одной и той же единицей (джоуль). Единица мощности ватт служит для измерения механической мощности, активной мощности электрических цепей и установок, теплового потока, звуковой мощности и потока звуковой энергии.

3. Удобство размера единиц.

4. Возможность образования кратных и дольных единиц (киловатт, мегаватт, миллиметр и т. д.).

5. Простота образования любых единиц на основе уравнений физических величин.

6. Широкое распространение. В некоторых разделах науки и техники многие из единиц этой системы употреблялись с давнего времени. К таким единицам относятся свыше 30 единиц электрических и магнитных величин, единицы всех световых величин и частично единицы в области ионизирующих излучений.

Большая группа специалистов (электрики, светотехники) давно пользуется единицами СИ, и для этой группы специалистов освоение единиц СИ не представляет сложности.

7. Высокая точность воспроизведения основных единиц. Успешное развитие многих технических наук и физики невозможно без повышения точности измерений, которая в значительной степени определяется точностью воспроизведения единиц. Так, в точной механике, оптике и технологии машиностроения допуски в ряде случаев не превышают 10^{-6} м. Определение метра в Международной системе единиц позволяет повысить точность его воспроизведения на порядок. Новое определение секунды также значительно повышает точность ее воспроизведения.

Погрешность передачи размера основной единицы силы в системе МКГСС посредством пружинных динамометров составила бы примерно 10^{-3} , в то время как

размер основной единицы массы — килограмма — передается с погрешностью не выше $2 \cdot 10^{-9}$, т. е. на шесть порядков точнее, чем погрешность единицы силы в МКГСС. С высокой точностью воспроизводятся и другие основные единицы СИ.

Определение единиц СИ дает возможность дальнейшего повышения точности по мере совершенствования средств и методов измерения.

8. Строгая логичность и четкость структуры построения системы.

Единицы СИ способствуют уточнению некоторых терминов и понятий и исключению терминов, не соответствующих физической сущности величин, таких, как расход вещества, грузоподъемность сооружений. В теплотехнике нередко используют термин «весовой расход» по отношению к жидкостям, сыпучим материалам и газам. Следует же применять термины «массовый» или «объемный расход».

Термин «грузоподъемность» определяет два понятия: силы при расчете прочности сооружений и мощности двигателей, а также массы при определении производительности кранов, судов и т. п. Смешению понятий веса и массы способствовал один и тот же корень терминов единицы силы (килограмм-сила) и единицы массы (килограмм). Единице силы СИ присвоено наименование «ньютон», что исключает возможность смешения этой единицы с единицей массы.

Масса является мерой инертности вещества. Согласно теории относительности

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоя; v — скорость движения массы; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве.

Заметное изменение массы возникает лишь при скоростях в несколько миллионов метров в секунду.

Вес тела G , т. е. сила тяжести тела, действующая на опору, зависит от широты местности φ , следовательно, от значения ускорения свободного падения g . На высоте уровня моря зависимость ускорения g от широты φ выражается формулой [5]

$$g = 978,049(1 + 0,005288 \sin^2 \varphi - 0,000006 \sin^2 2\varphi).$$

Минимальное значение, равное $9,780$ м/с², ускорение принимает на экваторе, максимальное, равное $9,832$ м/с², — на полюсах. Таким образом, вес одного и того же тела уменьшается на 0,5% при переносе его с экватора на полюс. Вес тела меняется, если его погружают в жидкость или поднимают над уровнем моря. Например, в космическом пространстве возникает явление невесомости. Масса же при этом сохраняется.

Грузоподъемность транспортных средств (судов, поездов, самолетов, кранов) характеризуется количеством вещества (продукта), которое они поднимают или перевозят, и поэтому эту величину следует рассматривать как массу. В единицах массы следует выражать расход газа, пара, топлива, воды. В единицах массы определяют уро-

жай, грузооборот портов, удельный расход топлива и воды, водоизмещение судов.

В расчетах мощности двигателей насосов, перекачивающих жидкость, двигателей кранов, поднимающих грузы, а также в расчетах прочности конструкций этих сооружений необходимо использовать понятие «вес» («сила тяжести»). В этом случае вместо термина «грузоподъемность» лучше применять термин «подъемная сила».

Г Л А В А 2. УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ И ИХ ЕДИНИЦАМИ

§ 4.

Размерности величин

Связь между физическими величинами выражается математическими уравнениями. Каждая из физических величин может иметь много конкретных реализаций, т. е. принимать различное количественное содержание. Однако уравнения, связывающие физические величины, не меняют свою форму в зависимости от выбранных единиц или количественного значения отдельных величин, хотя числовые значения величин зависят от примененных единиц.

Следовательно, уравнения, связывающие физические величины, надо рассматривать как математические выражения понятий, а не только как операции над конкретными числовыми реализациями величин. Например, выражение, определяющее мощность P на валу механизма через угловую скорость ω и момент M , сохраняет свой вид независимо от выбранных единиц, хотя числовое значение величины P зависит от них. В уравнения, связывающие величины, могут входить числовые коэффициенты, возникшие в результате определения самой величины. Таковы, например, длина окружности πD и ее площадь $\pi D^2/4$, потенциальная энергия электрического поля $CU^2/2$, средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы $W = \frac{3}{2} \frac{R}{N} T$ (где R — газовая постоянная; N — число Авогадро; T — термодинамическая температура), мощность цепи трехфазного тока $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ (где U и I — линейные напряжение и ток). Коэффициенты π , $1/2$, $3/2$, $\sqrt{3}$ не

зависят от употребляемых единиц величин, — они возникли в результате определения понятия о самих величинах (длины, площади, энергии, мощности).

В общем случае физическую величину $Y = f(X, Z, T)$ можно выразить в виде $Y = kX^\alpha Z^\beta T^\gamma$, т. е. в виде произведения величин X, Z, T , возведенных в степень, на коэффициент k , определяющий величину. В правой части уравнения могут быть любые величины (ток, напряжение, скорость и пр.), определяющие искомую.

Большой интерес с метрологических позиций представляют такие зависимости, в которых правая часть уравнений состоит из произведений строго регламентированных (основных) величин, что возможно, если совокупность величин представляет определенную систему. В этом случае любая физическая величина будет выражена через произведение степеней основных величин. Такой подход к построению уравнений между величинами позволяет сопоставлять любые физические величины.

Выражение, связывающее величину Y с основными величинами X, Z, T системы, в котором коэффициент пропорциональности равен единице, называют размерностью физической величины. Ранее это выражение называли формулой размерности. Метод классификации единиц системы на основные и производные, предложенный Гауссом, целесообразно применять и к самим величинам. Если рассматривать единицы как конкретные реализации величин, то основной физической величиной следует назвать величину, входящую в систему и не зависящую от других физических величин, а производной — величину, входящую в систему и определяемую через основные величины этой системы. Тогда, например, в системе LMT основными величинами будут длина, масса и время, а в системе LFT — длина, сила и время.

Показатели степеней основных величин (α, β, γ) называют показателями размерности. Они могут быть положительными и отрицательными, целыми и дробными числами. Размерность величин имеет вид $\dim Y = X^\alpha Z^\beta T^\gamma$ (\dim — от французского слова *dimension*, т. е. размерность). Размерностью производной величины определяется ее размер в зависимости от размеров основных величин. В частном случае, если $\dim Y = X^0 Z^0 T^0 = 1$, то это значит, что размер величины Y не зависит от размера основных величин. Естественно,

размер такой величины не зависит и от размера производных величин, поскольку последние определяются через основные. Подобные величины принято называть безразмерными. К числу безразмерных величин относятся, например, коэффициент преломления, числа Рейнольдса, Нуссельта и Прандтля, коэффициент усиления, коэффициент трансформации. Размерность физических величин зависит от избранной системы, например, в системе LMT масса имеет размерность M , а в системе LFT ее размерность равна $L^{-1}FT^2$. Работа и мощность в системе LMT имеют размерности L^2MT^2 и L^2MT^{-3} , а в системе LFT — соответственно LF и LFT^{-1} . Давление в системах СГС и Международной имеет размерность $L^{-1}MT^{-2}$, а в системе LFT — размерность $L^{-2}F$.

Размерности величин могут оказаться полезными для проверки правильности математических операций, выполняемых в теоретических исследованиях. Правая и левая части любых уравнений, связывающих физические величины, должны иметь одну и ту же размерность в избранной системе. При проверке уравнений следует сопоставлять математическое выражение величины с ее размерностью в принятой системе. При этом надо помнить, что размерность любой физической величины зависит от выбранных основных величин применяемой системы. Размерность величин нельзя рассматривать изолированно от их системы, так как именно выбор системы определяет размерность.

Однако размерность не всегда определяет все характерные признаки соответствующей величины. Существуют различные физические величины, имеющие одну и ту же размерность, например момент силы и работа. Обе эти величины выражаются в виде произведения силы на длину, хотя, по существу, они различны.

В Международной системе одинаковую размерность имеют линейная плотность тока, интенсивность намагничивания и напряженность магнитного поля ($L^{-1}I$). В Гауссовой системе одинаковы по размерности емкость и длина. Во всех системах одну и ту же размерность имеют модули упругости при сжатии и растяжении, давление и напряжение в материале.

Размерность физической величины не зависит от того, какой характер (векторный или скалярный) имеет величина.

В системах величин могут быть различны как сами основные величины, так и их количество. Системы бывают одно-, двух- и n -размерными. Практическое применение нашли системы трех-, четырех-, шести- и семиразмерные: LMT , LFT , $LMTI$, LMT_{μ_0} , LMT_{ϵ_0} , $LMT\Theta J$ и $LMTI\Theta JN$. Операции с размерностями подчинены правилам алгебры.

Пример 1. Пусть некоторая физическая величина S является функцией двух других физических величин P и Q , т. е. $S = f(P, Q)$. Предположим, что величина Q является производной, например, $\dim Q = X^\alpha Y^\beta Z^\gamma$, а величина P выражается размерностью вида $\dim P = X^\delta Y^\epsilon Z^\eta$.

Тогда

$$\dim S = f[X^\alpha Y^\beta Z^\gamma X^\delta Y^\epsilon Z^\eta].$$

Если $S = PQ$, то $\dim S = X^{\alpha+\delta} Y^{\beta+\epsilon} Z^{\gamma+\eta}$; если $S = Q/P$, то $\dim S = X^{\alpha-\delta} Y^{\beta-\epsilon} Z^{\gamma-\eta}$; если $S = (Q/P)^n$, то $\dim S = X^{(n\alpha-\delta)n} Y^{(n\beta-\epsilon)n} Z^{(n\gamma-\eta)n}$.

Однородные физические величины обязательно имеют одинаковые размерности, что понятно и из физической сущности величин, однако одинаковые размерности только до некоторой степени свидетельствуют об однородности, т. е. об идентичности понятий, определяющих соответствующие величины (например, работа A и момент силы M).

Математические операции с величинами и их единицами должны соответствовать физическому существу явлений и процессов. Физические величины одной природы (однородные) можно складывать и вычитать, но с разнородными величинами такие операции недопустимы. Иногда сложение однородных величин также лишено смысла, например сложение удельных величин (плотности, диэлектрической проницаемости) или температуры тел [28].

Рассмотрим связь между системами величин и системами единиц. Единицы представляют собой частные реализации величин, и поэтому одну и ту же систему величин можно представить серией систем единиц. Например, систему LMT можно представить системами единиц СГС, МКС и МТС, систему LFT — системой единиц МКГСС.

В общем случае конкретные реализации величины $X \equiv \{X\}[X]$ могут различаться между собой, если их единицы $[X]$ различны. Уравнение для единиц может

содержать помимо числового коэффициента k , определяющего величину, еще и коэффициент, зависящий от выбранных единиц, т. е.

$$[Y] = k_k [X]^a [Z]^b.$$

Коэффициент k присутствует в уравнениях, правая часть которых содержит единицы разных систем или внесистемные единицы. Соответственно применяемым единицам изменяются числовые значения величин. Типичные примеры подобных уравнений рассмотрены ниже.

§ 5.

Форма математических выражений и единицы физических величин

В научной и технической литературе встречаются 3 типичных вида формул и уравнений [7,9].

1. Формулы критериев и безразмерных параметров. Они не зависят от применяемых единиц физических величин, поэтому числовые значения безразмерных критериев (например, критериев Нуссельта Nu , Рейнольдса Re , Прандтля Pr) и параметров в любой системе единиц одинаковы.

2. Формулы и уравнения связи между физическими величинами как содержащие, так и не содержащие числовые коэффициенты, которые входят в определение величин, неизменны в любой системе единиц (например, длина окружности πD , площадь треугольника $bh/2$, кинетическая энергия $mv^2/2$, активная мощность электрической цепи однофазного тока $P = UI \cos \varphi$, работа $A = Fl \cos \alpha$).

Однако замена одних величин другими (например, удельного веса — плотностью, сопротивления — проводимостью, угловой скорости — частотой вращения) вызывает изменение вида формул, связывающих эти величины.

Пример 2. Емкость сточно-циркуляционной цистерны в дизельных установках, выраженная в m^3 , равна

$$V = (1,3 + 1,4) \frac{G}{\gamma},$$

где G — вес масла в системе смазки, кгс; γ — удельный вес масла, кгс/ m^3 .

Эту формулу следует писать в виде

$$V = (1,3 + 1,4) \frac{m}{\rho},$$

где m — масса масла в системе смазки, кг; ρ — плотность, кг/ m^3 .

Пример 3. Выражение для весового расхода газа в час имеет вид

$$G_1 = 3600 \frac{\pi D^2}{4} 10^{-6} \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \Delta p \gamma \cdot 10^4}{735,6}},$$

где α — диаметр шайбы, мм; Δp — перепад давления, мм рт. ст.; γ — удельный вес, кгс/ m^3 .

Массовый расход газа в кг/с равен

$$G_2 = \frac{\pi D^2}{4} \alpha \sqrt{2 \Delta p \rho},$$

где α — диаметр шайбы, м; Δp — перепад давления, Па; ρ — плотность, кг/ m^3 .

Пример 4. Формула для динамического момента M_d имеет вид

$$M_d = \frac{GD^2}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

где GD^2 — маховой момент; n — частота вращения, об/мин. Если вместо махового момента использовать момент инерции J , то $M_d = Jd\omega/dt$.

3. Особенно большим изменениям подвергаются формулы и уравнения связи между числовыми значениями величин при замене одних системных или внесистемных единиц другими. В этом случае изменяются числовые коэффициенты уравнений. Так, момент кручения вала, если угол кручения φ_0 выразить в градусах угла, записывается в виде

$$M = \frac{\pi}{180} \frac{GJ\varphi_0}{l}.$$

Пример 5. Мощность P_e на валу турбозубчатого агрегата (в л. с.) равна $P_e = \frac{427}{75} HQ\eta_e$, где 427 — числовое значение механического эквивалента теплоты; H — адиабатический перепад тепла, ккал/кг; Q — расход пара, кг/с; η_e — к. п. д. агрегата. В единицах СИ формула для P_e имеет вид $P_e = HQ\eta_e$ (здесь H выражен в Дж/кг, Q — в кг/с). В этой формуле числовой коэффициент отсутствует, так как все величины выражены в когерентной системе единиц.

Пример 6. Мощность судовой энергетической установки P , необходимая для движения судна, определяется из формулы

$$P = k \frac{Rv}{\eta_1 \eta_2},$$

где R — буксировочное сопротивление судна, тс; v — скорость, уз; η_1 — пропульсивный к. п. д.; η_2 — к. п. д. валопровода. Если P выразить в л. с., то формула примет вид

$$P = \frac{514Rv}{75\eta_1\eta_2} \approx 6,85 \frac{Rv}{\eta_1\eta_2}.$$

В единицах СИ

$$P = \frac{Rv}{\eta_1\eta_2}.$$

Если выразить R в килоньютонах, v в узлах, а P в киловаттах, то

$$P = \frac{0,514R_2v_2}{\eta_1\eta_2}.$$

Пример 7. Для анализа экономичности судовых энергетических установок используют выражение $i_v = P/Dv$, где P — мощность установки, л. с.; D — дедвейт, т; v — скорость хода, уз. Если мощность P выразить в ваттах, скорость v — в метрах в секунду, дедвейт D — в килограммах, то единицей измерения i_v будет джоуль на метр-килограмм (Дж/(м·кг)). Если единицы скорости и дедвейта оставить прежними, то i_v будет выражаться в ваттах на узелтонну,

$$1 \text{ Вт}/(\text{уз} \cdot \text{т}) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{уз} \cdot \text{т}).$$

Рассмотрим общий случай перехода от одних единиц к другим в формулах для числовых значений величин и покажем способ пересчета числовых коэффициентов в этих формулах.

Пусть в формуле, связывающей числовые значения величин X, Y, Z , имеется некоторый коэффициент k , зависящий от примененных в формуле единиц. Например, дана формула $Y = kX^mZ^n$. Найдем зависимость для числовых значений, исходя из уравнений связи между величинами:

$$\{Y_1\}[Y_1] = k_1\{X_1\}^m\{Z_1\}^n[X_1]^m[Z_1]^n,$$

где $[X_1], [Y_1], [Z_1]$ — единицы величин; $\{X_1\}, \{Y_1\}, \{Z_1\}$ — числовые значения величин в принятых единицах.

Если единицы когерентны, то $[Y_1] = [X_1]^m[Z_1]^n$, а числовые значения связаны уравнением $\{Y_1\} = k_1\{X_1\}^m\{Z_1\}^n$.

В новой системе единиц $[Y_2] = [X_2]^m[Z_2]^n$ и $\{Y_2\} = k_2\{X_2\}^m\{Z_2\}^n$. Отсюда

$$\left\{ \frac{Y_2}{Y_1} \right\} = \frac{k_2}{k_1} \left\{ \frac{X_2}{X_1} \right\}^m \left\{ \frac{Z_2}{Z_1} \right\}^n, \quad \text{или} \quad \{Y_0\} = \frac{k_2}{k_1} \{X_0\}^m \{Z_0\}^n,$$

где $Y_0 = Y_2/Y_1$, $X_0 = X_2/X_1$, $Z_0 = Z_2/Z_1$ — безразмерные величины. Тогда

$$k_2 = \frac{k_1\{Y_0\}}{\{X_0\}^m\{Z_0\}^n} = k_1 \frac{\left\{ \frac{Y_2}{Y_1} \right\}}{\left\{ \frac{X_2}{X_1} \right\}^m \left\{ \frac{Z_2}{Z_1} \right\}^n} = k_1 \frac{\left[\frac{Y_1}{Y_2} \right]}{\left[\frac{X_1}{X_2} \right]^m \left[\frac{Z_1}{Z_2} \right]^n}.$$

Последнее уравнение связывает коэффициенты k_2 и k_1 с отношениями единиц старой (X_1, Y_1, Z_1) и новой (X_2, Y_2, Z_2) систем. Таким образом, для определения коэффициента в новой системе единиц необходимо произведение коэффициента старой системы и отношения единиц старой и новой систем, стоящих в левой части уравнения, разделить на отношения единиц старой и новой систем, стоящих в правой части уравнения, возведенные в степени m и n соответствующих единиц величин.

Пример 8. Теоретическая скорость истечения пара в паровой турбине (в м/с) равна $c_0 = k_1 h_{a1}^{1/2}$, где $k_1 = 91,5$; h_{a1} — адиабатический перепад тепла, ккал/кг.

Единицей СИ для h_{a1} является Дж/кг. Согласно приведенному выше правилу, если $c_0 = k_2 h_{a2}^{1/2}$, $k_2 = k_1 \frac{1}{\left[\frac{h_{a1}}{h_{a2}} \right]^{1/2}}$, то

$$c_0 = 91,5 \frac{1}{[4186,8]^{1/2}} = \frac{91,5}{64,7} = 1,41 \quad \text{и} \quad c_0 = 1,41 h_{a2}^{1/2}.$$

Пример 9. Формула для внутренней полезной мощности P_1 газотурбинной установки имеет вид $P_1 = k_1 Q_1 h_{i1} = 5,69 Q_1 h_{i1}$, где Q_1 — расход воздуха, кг/с; h_{i1} — полезный перепад тепла, ккал/кг.

Чтобы выразить мощность в ваттах, следует использовать формулу $P_2 = k_2 Q_2 h_{i2}$, где $k_2 = k_1 736/4186,6 = 5,69 \cdot 0,175 \approx 1$, т. е. $P_2 = Q_2 h_{i2}$, где $Q_2 = Q_1$, а h_{i2} выражено в джоулях.

Пример 10. Мощность (в л. с.), необходимая для движения судна, равна

$$P_1 = \frac{D_1^{1/2} v_1^{3,25}}{c_1},$$

где D_1 — водоизмещение, т; v_1 — скорость хода судна, уз; $c_1 = 100 \div 120$.

Используя единицы СИ (кг, м/с), получаем

$$P_2 = \frac{D_2^{1/2} v_2^{3,25}}{c_2}; \quad \frac{1}{c_2} = \frac{1}{c_1} \frac{\left[\frac{P_1}{P_2} \right]}{\left[\frac{D_1}{D_2} \right]^{1/2} \left[\frac{v_1}{v_2} \right]^{3,25}}.$$

§ 6.

Рационализация уравнений электромагнитного поля

В современной электротехнической литературе представлены уравнения, как правило, в так называемой рационализованной форме, а в физических исследованиях и в некоторых других случаях используют нерационализованную форму уравнений электромагнитного поля. Эти две формы отличаются коэффициентом 4π , введенным в уравнения в период создания теории электрических и магнитных явлений. Коэффициент 4π характеризует шаровую симметрию, однако в ряде выражений теоретической электротехники присутствие этого коэффициента не связано с шаровой симметрией [12].

В 1882 г. английский физик Хевисайд предложил изменить систему выражений, характеризующих электромагнитные явления, таким образом, чтобы коэффициент 4π присутствовал в формулах, связанных с шаровой симметрией, и был исключен из других часто применяемых формул. Преобразованные указанным образом выражения приобрели рациональную, или рационализованную, форму.

В современной литературе существуют две точки зрения на смысл рационализации уравнений электромагнитного поля.

Согласно первой концепции, обычно встречающейся в теоретической и прикладной электротехнике, рационализация не изменяет понятия о величине, т. е. о ее виде и характере, а изменяет размер единицы, поэтому ее называют рационализацией единиц. Таким образом, возникают две совокупности единиц — рационализованные и нерационализованные.

Согласно второй концепции рационализация изменяет понятия о физических величинах, но не влияет на размер единиц. Производные единицы определяют из формул размерности с неизменными основными единицами величин. В соответствии с этой концепцией такую рационализацию называют рационализацией величин. Вторая точка зрения часто встречается в литературе по физике и теоретической электронике.

Метрологи, как правило, придерживаются первой концепции, которая принята в государственных стандартах на электрические и магнитные единицы.

Первая концепция представляет большие практические удобства. Так как практическое определение величины (метод ее измерения) не зависит от рационализации, то понятие о величине следует считать неизменным. Однако числовые значения некоторых величин при рационализации изменяются, что следует объяснить изменением размера их единиц.

Рационализация уравнений электромагнитного поля не изменяет размеры основных единиц (длины, массы и времени) и их производных (неэлектромагнитной природы), например, единиц работы, скорости и силы.

Рационализация не коснулась единиц, наиболее распространенных в практике электрических и магнитных величин: силы тока, заряда, напряжения, электродвижущей силы, напряженности электрического поля, сопротивления, емкости, магнитного потока, магнитной индукции и индуктивности. Единицы этих величин в Международной системе (ампер, кулон, вольт, вольт на метр, ом, фарада и пр.) при рационализации не изменились.

В результате рационализации изменились размеры единиц электрической и магнитной постоянных, единиц абсолютной диэлектрической и магнитной проницаемости, напряженности магнитного поля, магнитодвижущей силы, магнитного сопротивления и магнитной проводимости, а также числовые значения этих величин.

Соотношения между некоторыми рационализованными и нерационализованными числовыми значениями физических величин представлены в табл. 1.

В приведенных ниже примерах символы нерационализованных величин в отличие от рационализованных имеют индекс 1.

Вследствие рационализации изменилась форма записи некоторых законов и уравнений электромагнетизма, ставшая более соответствующей физическому смыслу этих законов и уравнений. Нерационализованная форма уравнений электромагнитного поля обычно применяется в сочетании с симметричной системой Гаусса. В этом случае в ряде выражений появляется коэффициент c^n . (В приведенных ниже уравнениях этот коэффициент опущен.)

Таблица 1

Соотношения между рационализованными и нерационализованными числовыми значениями физических величин

Величина	Классическая форма	Рационализованная форма
Магнитная постоянная	μ_{01}	$\mu_0 = 4\pi\mu_{01}$
Абсолютная магнитная проницаемость	μ_{a1}	$\mu_a = 4\pi\mu_{a1}$
Электрическая постоянная	ϵ_{01}	$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_{01}}{4\pi}$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ϵ_{a1}	$\epsilon_a = \frac{\epsilon_{a1}}{4\pi}$
Магнитная масса	m_1	$m = 4\pi m_1$
Напряженность магнитного поля	H_1	$H = \frac{H_1}{4\pi}$
Магнитодвижущая сила	F_1	$F = \frac{F_1}{4\pi}$
Магнитное сопротивление	R_1	$R = \frac{R_1}{4\pi}$
Магнитная проводимость	G_{M1}	$G_M = 4\pi G_{M1}$

Закон Кулона для электростатики:

$$F_1 = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_{a1} r^2};$$

$$F = \frac{q_1 q_2}{\frac{\epsilon_{a1}}{4\pi} 4\pi r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_a r^2}.$$

Закон Био — Савара — Лапласа:

$$dH_1 = k \frac{dB}{\mu\mu_{01}} = k \frac{I dl \sin(\widehat{dl}, r)}{r^2};$$

$$dH = k \frac{dB}{\mu\mu_0} = k \frac{I dl \sin(\widehat{dl}, r)}{4\pi r^2}.$$

Закон Ампера для взаимодействия двух параллельных токов в вакууме:

$$F_1 = k \frac{2\mu_{01} I_1 I_2 l}{a};$$

$$F = k \frac{2 \cdot 4\pi\mu_{01} I_1 I_2 l}{4\pi a} = k \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

Поток вектора напряженности магнитного поля по теореме Гаусса:

$$\oint E_1 dS = \frac{4\pi q}{\epsilon_{a1}};$$

$$\oint E dS = \frac{4\pi q}{\frac{\epsilon_{a1}}{4\pi} 4\pi} = \frac{q}{\epsilon_a}.$$

Дифференциальные уравнения Максвелла:

$$\text{rot } H_1 = 4\pi J + \frac{\partial D_1}{\partial t}; \quad \text{rot } E_1 = -\frac{dB}{dt};$$

$$\text{div } D_1 = 4\pi\rho; \quad \text{div } B_1 = 0;$$

$$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad \text{rot } E = -\frac{dB}{dt};$$

$$\text{div } D = \rho; \quad \text{div } B = 0.$$

Интегральные уравнения Максвелла:

$$\oint H_1 dl = 4\pi I = F_1 \quad \text{и} \quad \oint E_1 dl = -\frac{d\Phi}{dt};$$

$$\oint H dl = I = F \quad \text{и} \quad \oint E dl = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Емкость:

а) плоского конденсатора

$$C_1 = \frac{\epsilon_{a1} S}{4\pi\delta}; \quad C = \frac{\epsilon_a S}{\delta};$$

б) цилиндрического конденсатора

$$C_1 = \frac{\epsilon_{a1} l}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad C = \frac{2\pi\epsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}};$$

в) уединенного шара

$$C_1 = \epsilon_{a1} r; \quad C = 4\pi\epsilon_a r;$$

г) шарового конденсатора

$$C_1 = \frac{\epsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1}; \quad C = \frac{4\pi\epsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

Напряженность магнитного поля прямого тока:

$$H_1 = \frac{2I}{r}; \quad H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Напряженность магнитного поля кругового тока:

$$H_1 = \frac{2\pi I}{r}; \quad H = \frac{I}{2r}.$$

Напряженность магнитного поля в центре длинного соленоида с числом витков N :

$$H_1 = 4\pi \frac{NI}{l}; \quad H = \frac{NI}{l}.$$

Г Л А В А 3. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ

§ 7.

Основные единицы

1. Единица длины — метр (м, или m).

Документ [36] определял метр как расстояние между осями двух средних штрихов, нанесенных на платиноиридиевом бруске, хранящемся в Международном бюро мер и весов и принятым в качестве прототипа метра I Генеральной конференцией по мерам и весам.

Копия этого эталона, имеющая знак № 28, являлась Государственным эталоном СССР единицы длины — метра. Абсолютная погрешность определения метра посредством этого эталона составляет менее 10^{-7} м.

В настоящее время единица длины метр воспроизводится посредством эталонного интерференционного компаратора в соответствии со следующим определением этой единицы в Международной системе: *метр — длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86* [43].

Способ определения метра по естественному эталону основан на явлении интерференции волн, т. е. усилении или ослаблении колебаний световых волн при их наложении в зависимости от разности фаз [4].

В стационарном состоянии атом не излучает энергии. Переход электрона с орбиты k на орбиту i вызывает излучение или поглощение кванта света.

Энергия кванта равна $h\nu_{ik} = E_k - E_i$, где h — постоянная Планка; ν_{ik} — частота световых колебаний; E_k и E_i — уровни энергии атома. Частота $\nu_{ik} = c/\lambda_{ik}$, где c — скорость распространения света в вакууме; λ_{ik} — длина волны.

Символы $2p_{10}$ и $5d_5$, указанные в определении метра, соответствуют определенным энергетическим состояниям атома криптона-86 (Kr^{86}). Цифры 2 и 5 определяют главное квантовое число, цифры в индексе обозначают подгруппы энергетических состояний, или так называемых термов. Буквы p и d определяют внутреннее квантовое число, т. е. полный момент количества движения электронов. Длина волны оранжевой линии атома Kr^{86} , соответствующая переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$, равна $0,6057 \cdot 10^{-6}$ м.

Возбуждение атомов осуществляют потоком электронов от подогретого катода, помещенного в разрядную трубку, заполненную криптоном при давлении порядка тысячных долей атмосферного. Внутренний диаметр трубки равен 2—4 мм. К системе анод—катод подведено высокое напряжение (1500 В); под действием этого напряжения в трубке происходит тлеющий разряд, и возникает свечение, имеющее линейчатый спектр. Газоразрядная трубка помещается в сосуд Дьюара, наполненный жидким азотом при температуре 63 К. Оранжевая линия выделяется монохроматором и направляется в интерферометр, с помощью которого сравнивают длину волны этой линии спектра со штриховыми и концевыми эталонами длины.

Относительная погрешность воспроизведения длины волны оранжевой линии атома Kr^{86} составляет $(1 \div 2) \cdot 10^{-8}$. Эта погрешность по крайней мере на один порядок меньше, чем погрешность воспроизведения по штриховому эталону.

2. Единица массы — килограмм (кг, или kg).

Килограмм — масса, равная массе международного прототипа килограмма. Платиноиридиевый прототип

килограмма хранится в Париже. Советский Союз имеет две копии прототипа со знаками № 12 и 26. Копия со знаком № 12 является Государственным эталоном СССР единицы массы килограмма. Этот образец представляет собой цилиндр из платиноиридиевого сплава высотой 39 мм и диаметром 39 мм.

Погрешность сличения образцов килограмма составляет $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ кг, следовательно, определение килограмма производится с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-9}$.

3. Единица времени — секунда (с, или s).

Ранее единицу времени определяли по промежуткам времени, соответствующим вращению Земли вокруг своей оси (сутки) и вращению Земли вокруг Солнца (год), и считали равной $1/86400$ средних солнечных суток.

Современные приборы хранения и воспроизведения секунды (кварцевые часы и молекулярные генераторы) позволили обнаружить неравномерность вращения Земли вокруг своей оси. Поэтому было дано следующее более точное определение: секунда — это $1/31\,556\,925,9747$ часть тропического года на 0 января 1900 г. в 12 ч эфемеридного времени. Тропический год представляет собой более постоянный промежуток времени — его продолжительность уменьшается на 0,5 с за столетие. В приведенном выше определении принято тропический год считать начавшимся в 12 ч дня 31 декабря 1899 г. Такое определение секунды соответствует средней продолжительности старой секунды за последние 300 лет. (Слово «эфемеридное» обозначает равномерно текущее время, в отличие от времени, определяемого из астрономических наблюдений, которое имеет некоторые колебания, в частности, из-за неравномерного вращения Земли).

Относительная погрешность определения секунды как доли тропического года составляет 10^{-10} .

Стремление повысить точность воспроизведения секунды привело к использованию атомно-молекулярных процессов. В настоящее время секунду определяют по атомному цезиевому эталону. Основным элементом этого прибора — вакуумная камера с пучком атомов цезия-133. Этот пучок выбрасывается печью, проходит поле отклоняющих магнитов, между которыми расположен резонатор, создающий высокочастотное поле. Если частота этого поля близка к частоте определенной спектральной линии сверхтонкой структуры, то возникает резонанс. О резонансе судят по изменению интенсивности атомного пучка цезия, содержащего атомы, совершившие переходы в другое состояние. Попадая на ионизационный детектор, атомный пучок создает ток, используемый для автоматического регулирования частоты генератора, соответствующей частоте резонанса.

На XIII Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 г. было принято следующее определение единицы времени: *секунда — время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133* [43].

Государственный эталон СССР единиц времени и частоты состоит из группы атомно-молекулярных мер времени, кварцевых часов и устройств для сличения эталонных частот. Относительная погрешность воспроизведения частоты составляет $\pm (1 \div 5) \cdot 10^{-12}$ [18]. Хранение времени и частоты осуществляется с помощью кварцевых часов.

4. Единица силы тока — ампер (А).

Определение этой единицы, основанное на законе Ампера для двух взаимодействующих токов, сформулировано следующим образом: *ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины* [43].

Согласно закону Ампера сила взаимодействия F между двумя токами I_1 и I_2 в вакууме равна

$$F = \frac{2\mu_0 I_1 I_2 l}{a},$$

где μ_0 — магнитная постоянная вакуума; l — длина проводов участка взаимодействия; a — расстояние между проводниками.

Новая формулировка ампера как единицы Международной системы устанавливает простую связь с единицей тока системы СГСМ, на основе которой была принята практическая единица силы тока, и определяет размер единицы СИ, близкий к принятому ранее.

Таким образом, если $I_1 = I_2 = 1 \text{ А} = 0,1 \text{ ед. СГСМ}$, $l = a = 1 \text{ м} = 100 \text{ см}$, $\mu_0 = 1$, то $F = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ дин}$ или $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Практически воспроизвести единицу силы тока, пользуясь приведенным выше определением, невозможно, т. е. невозможно сделать два провода бесконечной длины и ничтожно малого сечения, строго параллельных один другому:

Однако, пользуясь законом Ампера, нетрудно построить систему токнесущих устройств, силу взаимодействия которых можно теоретически определить и практически измерить с весьма высокой точностью.

На основе таких строго обоснованных расчетов построены весы, в которых сила взаимодействия токов катушек уравнивается эталонными грузами. В Советском Союзе такие весы, называемые токовыми, или ампер-весами, созданы под руководством Л. В. Залуцкого и Б. М. Яновского при участии С. В. Горбачевича и Н. А. Волкова [25]. Они позволяют определять ток по его механическому эффекту.

В этих весах соленоиды соединены последовательно и сила их взаимодействия равна $F = kI^2$, где k — расчетная постоянная, определяемая с весьма высокой точностью; I — сила тока. Так как сила тяжести, действующая на массы грузов второй чашки, равна mg (g — ускорение свободного падения в месте расположения весов), то при равновесии весов $kI^2 = mg$, откуда $I = \sqrt{mg/k}$. Возможные источники погрешности токовых весов сведены к минимуму: специальное расположение, конструкция и размеры токоподводящей части катушек практически исключают электромагнитное взаимодействие; исключено механическое влияние подводящих проводников на силу, создаваемую взаимодействием катушек; температура в зоне весов строго постоянна; в помещении, предназначенном для весов, отсутствуют магнитные материалы; исключено влияние полей токов соседних помещений.

Постоянная этих весов, т. е. отношение силы взаимодействия соленоидов к произведению их токов, равна $3860,5550 \cdot 10^{-5} \text{ Н/А}^2$.

Ток весов, проходя по эталонной катушке сопротивлением 1 Ом, создает падение напряжения, которое сравнивают с электродвижущей силой нескольких эталонных (нормальных) элементов. Как известно, э.д.с. нормального элемента находится в пределах 1,01855—1,01875 В.

Определяемая на основании закона Ампера единица силы тока несколько отличается от международного ампера, воспроизводимого по электрохимическому эффекту и равного 0,99985 абсолютного ампера (основанного на механическом взаимодействии токов).

Другие международные электрические и магнитные единицы также несколько отличаются от абсолютных, например, 1 международный вольт равен 1,00035 абсолютного вольта, 1 международный ом равен 1,00050 абсолютного ома. Эти различия важны только при специальных исследованиях. (В литературе, вышедшей до 1948 г., электрические и магнитные единицы выражены в системе международных практических единиц).

Относительная погрешность воспроизведения ампера с помощью токовых весов составляет $\pm 10^{-5}$. Эту погрешность вызывают опытное определение величин m и g , а также теоретическое — величины k [18].

5. Единица термодинамической температуры — кельвин (К).

Принято следующее определение этой единицы: *кельвин — 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды.*

Температура характеризует интенсивность молекулярного движения. Известное из курса физики уравнение $E_{\text{ср}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \frac{R}{N} T = \frac{3}{2} kT$ (где m и v — масса и средняя квадратическая скорость поступательного движения молекул; R — газовая постоянная; N — число Авогадро; k — постоянная Больцмана, равная $1,308054 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$), связывает среднюю кинетическую энергию $E_{\text{ср}}$ поступательного движения молекул с абсолютной температурой T тела.

Температуру можно определять по различным физическим эффектам: расширению твердых, жидких и газообразных тел, изменению электрического сопротивления, термоэлектродвижущей силе и эффекту излучения.

В процессе развития науки в практику вошли разные температурные шкалы: Цельсия, Реомюра, Фаренгейта, абсолютная термодинамическая, Международная практическая температура и другие, отличающиеся началом отсчета температуры, а некоторые — и размером единицы температуры.

Термодинамическая температурная шкала основана на втором законе термодинамики, согласно которому В. Томсон (лорд Кельвин) установил, что цикл Карно позволяет построить шкалу температуры независимо от выбора термометрического тела [10]. Как известно, при совершении работы по этому циклу отношение температур T_1 нагревателя и T_2 холодильника пропорционально отношению Q_1 и Q_2 — количеств теплоты, получаемой от нагревателя и отдаваемой холодильнику, т. е. $T_1/T_2 = Q_1/Q_2$, откуда $T_2 = T_1 Q_2/Q_1$. Зная Q_1 и Q_2 и вы-

разив температуру T_1 в избранных единицах, можно найти температуру T_2 .

Термодинамическая температурная шкала совпадает с абсолютной шкалой температур для идеальных газов. Идеальные газы подчиняются законам Гей-Люссака и Бойля — Мариотта. Для этих газов зависимость давления и объема от температуры выражается в виде биномов $p = p_0(1 + \alpha_p t)$ и $V = V_0(1 + \alpha_v t)$, где p и p_0 , V и V_0 — соответственно давления и объемы газа при температуре, равной t и 0; α_p и α_v — температурные коэффициенты (незначительно отличающиеся от 1/273).

Некоторые реальные газы (водород, гелий, азот) в ограниченных интервалах подчиняются законам идеальных газов, и поэтому их используют для изготовления термометров. Водород применяют в качестве термометрического тела в диапазоне температур от -200 до 100°C ; азот — от 100 до 2000°C . Следовательно, газовый термометр можно применять для воспроизведения единицы температуры.

Если принять точку, в которой температура $T = 0$, за абсолютный нуль, то точка, имеющая температуру $T_0 = 273,16\text{ K}$, соответствует температуре тройной точки воды. Эту точку можно воспроизвести, если в запаянный стеклянный сосуд с водой, над которой находится водяной пар при давлении 611 Па , погрузить тающий лед. Устанавливающееся через некоторое время равновесное состояние трех фаз воды (льда, жидкости и пара) в закрытом сосуде и представляет собой тройную точку. Абсолютная погрешность воспроизведения этой точки составляет $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}\text{ K}$.

В настоящее время в науке и технике применяют также Международную практическую температурную шкалу 1968 г. (МПТШ-68).

6. Единица силы света — кандела (кд, или cd).

Кандела — сила 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 $101\,325\text{ Па}$ [43].

Полный излучатель представляет собой абсолютно черное тело, т. е. оптический приемник, полностью поглощающий все падающие на него излучения независимо от направления падения, спектрального состава и поляризации, или тепловой излучатель, который имеет наи-

большую мощность излучений при данной температуре для всех длин волн по сравнению с другими тепловыми излучателями. Такой излучатель представляет собой трубочку из окиси тория, открытую с одного конца и помещенную в расплавленную платину [8].

Эталон воспроизводит яркость, т. е. отношение силы света к площади, равную 60 кд/см^2 . Средняя квадратическая погрешность воспроизведения единицы силы света равна $\pm (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$.

7. Единица количества вещества — моль (моль, или mol).

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в нуклиде ^{12}C массой $0,012\text{ кг}$. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

§ 8.

Производные механические величины и их единицы

Частота периодического процесса ν (T^{-1})* представляет собой отношение количества циклов периодического процесса к времени. Если продолжительность одного цикла равна τ , то частота равна $\nu = 1/\tau$. Единица — герц (Гц, или Hz) — частота периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса.

Частота вращения f (T^{-1}) — отношение количества оборотов вращающегося тела к времени. Она равна $f = 1/t$, где t — время, в течение которого совершается один оборот вращающегося тела. Единица — секунда в минус первой степени (s^{-1} , или s^{-1}) — частота равномерного вращения, при которой за время 1 с совершается один оборот тела.

Угловая скорость ω (T^{-1}) — отношение угла φ поворота тела к времени t , т. е. $\omega = \varphi/t$. Единица — радиан в секунду (рад/с, или rad/s) — угловая скорость равно-

* Здесь и далее после наименования величины в скобках указана ее размерность.

мерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси на угол 1 рад.

Волновое число $\tilde{\nu}$ (L^{-1}) представляет собой отношение числа волн к длине l , на которой они укладываются. Если длина волны равна λ , то на длину пространства l приходится число волн, равное l/λ , т. е. $\tilde{\nu} = l/\lambda = 1/\lambda$. Единица — метр в минус первой степени (m^{-1} , или m^{-1}) — волновое число, при котором на длине 1 м укладывается 1 волна.

Плотность ρ ($L^{-3}M$) — отношение массы тела к его объему. Единица — килограмм на кубический метр (kg/m^3 , или kg/m^3) — плотность однородного тела, имеющего при объеме 1 m^3 массу 1 кг.

Удельный объем v (L^3M^{-1}) — отношение объема тела к его массе. Единица — кубический метр на килограмм (m^3/kg , или m^3/kg) — удельный объем однородного тела, при массе 1 кг занимающего объем 1 m^3 .

Момент инерции (динамический) тела J (L^2M) представляет собой сумму произведений масс отдельных материальных точек тела на радиусы этих точек относительно оси инерции. Единица — килограмм-метр в квадрате ($kg \cdot m^2$, или $kg \cdot m^2$) — момент инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси инерции.

Момент инерции площади плоской фигуры (осевой) J_z (L^4), равный $J_z = \int_s r^2 dS$, представляет собой сумму

произведений элементарных площадок на квадрат расстояния до оси, относительно которой определяется этот момент. Для полярного момента инерции расстояние r берется до некоторой условно выбранной точки. Момент инерции J_z следует применять вместо махового момента GD^2 (см. § 5). Единица — метр в четвертой степени (m^4 , или m^4).

Момент сопротивления W (L^3) представляет собой отношение момента инерции площади сечения к расстоянию l точки, наиболее удаленной от оси, относительно которой определен момент инерции. Единица — метр в третьей степени (m^3 , или m^3).

Момент количества движения L (L^3MT^{-1}) — это произведение количества движения материальной вращаю-

щейся точки на расстояние r до оси вращения, т. е. $L = mvr = m\omega r^2 = J\omega$, где J — момент инерции. Единица — килограмм-метр в квадрате в секунду ($kg \cdot m^2/s$, или $kg \cdot m^2/s$).

Сила F , P , Q , R (LMT^{-2}). Единица — ньютон (Н, или N) — сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 m/s^2 в направлении действия силы.

Импульс силы Ft (LMT^{-1}) представляет собой произведение силы F на время ее действия t . Импульс силы равен приращению количества движения. Единица — ньютон-секунда (Н·с, или N·s) — импульс силы, равной 1 Н и действующей в течение 1 с.

Давление p . Напряжение σ , τ ($L^{-1}MT^{-2}$). Единица — паскаль (Па, или Pa) — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 m^2 .

Работа A , W , L (L^2MT^{-2}). Единица — джоуль (Дж, или J).

Мощность P , N (L^2MT^{-3}). Единица — ватт (Вт, или W).

Динамическая вязкость μ , η ($L^{-1}MT^{-1}$), которую можно определить из формулы для силы внутреннего трения между слоями жидкостей и газов $F = -\mu \frac{dv}{dl} S$, где dv/dl — градиент скорости; S — площадь трущихся поверхностей; μ — некоторый коэффициент, зависящий от свойств жидкостей или газов. Знак «минус» означает, что сила F направлена в сторону, обратную направлению движения слоя, обладающего большей скоростью. Единица — паскаль-секунда (Па·с, или Pa·s).

Кинематическая вязкость ν (L^2T^{-1}) представляет собой отношение динамической вязкости к плотности среды (жидкости, газа), т. е. $\nu = \mu/\rho$. Единица — квадратный метр на секунду (m^2/s , или m^2/s).

Массовый расход Q_m (MT^{-1}) — отношение массы жидкости или газа, равномерно перемещаемой через поперечное сечение канала или трубы, к времени. Единица — килограмм в секунду (kg/s , или kg/s).

Объемный расход Q_v (L^3T^{-1}) — отношение объема вещества, равномерно перемещаемого через определенное сечение, к времени. Единица — кубический метр в секунду (m^3/s , или m^3/s).

§ 9.

Производные электрические и магнитные величины и их единицы

Плотность электрического тока \bar{d} ($L^{-2}I$), равная $\bar{d} = I/S$, где S — площадь поперечного сечения, по которому равномерно распределен ток I . Единица — *ампер на квадратный метр* (A/m^2 , или A/m^2).

Линейная плотность электрического тока J ($L^{-1}I$), равная $J = I/b$, где b — ширина тонкого листового проводника, по которому равномерно распределен ток I . Единица — *ампер на метр* (A/m , или A/m).

Количество электричества, заряд Q , q (TI), равное $Q = It$, где I — ток; t — время. Единица — *кулон* (Кл, или С) — количество электричества, проходящее через поперечное сечение при токе 1 А за время 1 с.

Объемная плотность электрического заряда ρ ($L^{-3}TI$), равная $\rho = Q/V$, где V — объем. Единица — *кулон на кубический метр* ($Кл/м^3$, или $С/м^3$).

Поверхностная плотность электрического заряда σ ($L^{-2}TI$), равная $\sigma = Q/S$, где S — площадь. Единица — *кулон на квадратный метр* ($Кл/м^2$, или $С/м^2$) — *поверхностная плотность электрического заряда, при которой на поверхности площадью 1 м² равномерно распределен электрический заряд 1 Кл.*

Электрический момент диполя p_3 (LTI), равный $p_3 = ql$, где q — заряды диполя, расположенные на расстоянии l друг от друга. Единица — *кулон-метр* ($Кл \cdot м$, или $С \cdot м$).

Поток электрического смещения Φ_D (TI), равный $\Phi_D = \oint DdS = Q$, где D — электрическое смещение; Q — количество свободного электричества, заключенного в части пространства, ограниченного поверхностью S . Единица — *кулон* (Кл, или С) — *поток электрического смещения сквозь замкнутую поверхность, внутри которой содержится свободный заряд 1 Кл.*

Электрическое смещение D ($L^{-2}TI$), равное $D = dQ/dS$, где dQ — количество электричества, сместившегося в диэлектрике сквозь элемент поверхности dS , нормальной к направлению смещения, при установлении электрического поля. Единица — *кулон на квадратный метр* ($Кл/м^2$, или $С/м^2$) — *электрическое смещение, при*

котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1 м² равен 1 Кл.

Электрическое напряжение U , **электрический потенциал** V , **разность электрических потенциалов** $V_1 - V_2$, **электродвижущая сила** E ($L^2MT^{-3}I^{-1}$). Единица — *вольт* (В, или V).

Напряженность электрического поля E ($LMT^{-3}I^{-1}$), равная $E = (V_1 - V_2)/l$, где l — расстояние между двумя точками вдоль линии напряженности, разность потенциалов которых равна $V_1 - V_2$. Единица — *вольт на метр* (В/м, или V/m) — *напряженность однородного электрического поля, при которой между точками, находящимися на расстоянии 1 м вдоль линии напряженности поля, создается разность потенциалов 1 В.*

Электрическая емкость C ($L^{-2}M^{-1}T^4I^2$), равная $C = Q/U$. Единица — *фарада* (Ф, или F).

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ϵ_a , **электрическая постоянная** ϵ_0 ($L^{-3}M^{-1}T^4I^2$). Если D — электрическое смещение, а E — напряженность электрического поля, то $\epsilon_a = D/E$. Единица — *фарада на метр* (Ф/м, или F/m) — *абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, в которой при напряженности электрического поля 1 В/м возникает электрическое смещение 1 Кл/м².*

Электрическое сопротивление r , R ($L^2MT^{-3}I^{-2}$), равное $r = U/I$. Единица — *ом* (Ом, или Ω).

Удельное электрическое сопротивление ρ ($L^3MT^{-3}I^{-2}$), равное $\rho = RS/l$, где S — площадь; l — длина проводника.

Единица — *ом-метр* (Ом \cdot м, или $\Omega \cdot м$).

Электрическая проводимость g , G ($L^{-2}M^{-1}T^3I^2$) — это проводимость проводника сопротивлением 1 Ом. Единица — *сименс* (См, или S).

Удельная электрическая проводимость σ , γ ($L^{-3}M^{-1}T^3I^2$). Единица — *сименс на метр* (См/м, или S/m).

Магнитный поток Φ , **потокосцепление** Ψ ($L^2MT^{-2}I^{-1}$). Магнитный поток сквозь поверхность, охваченную витком, равен $\Phi = QR$, где Q — количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника замкнутого контура сопротивлением R . Единица — *вебер* (Вб, или Wb) — *магнитный поток, при убывании которого до нуля в сцепленном с ним контуре сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл.*

Магнитная индукция B ($MT^{-2}I^{-1}$), равная $B = \Phi/S$, где S — площадь, нормальная к направлению потока. Единица — *тесла* (Т).

Напряженность магнитного поля H ($L^{-1}I$), определяемая из закона полного тока $\oint H dl = I$, где I — полный ток, проходящий сквозь рассматриваемую поверхность. Единица — *ампер на метр* (А/м, или А/м).

Магнитодвижущая сила F — разность магнитных потенциалов (I). Единица — *ампер* (А) — *магнитодвижущая сила вдоль замкнутого контура, сцепленного с контуром постоянного тока силой 1 А*.

Индуктивность L , взаимная индуктивность M ($L^2MT^{-2}I^{-2}$). Индуктивность равна $L = \Psi/I$, где Ψ — сцепленный с контуром магнитный поток; I — ток контура. Единица — *генри* (Г, или Н) — *индуктивность контура, с которым при силе постоянного тока в нем 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб*.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a , магнитная постоянная μ_0 ($LMT^{-2}I^{-2}$). Если $\oint B dl$ — линейный интеграл вектора магнитной индукции по замкнутому контуру в пустоте, а I — электрический ток сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, то $\mu_0 = \oint B dl/I$; $\mu_a = B/H$. Единица — *генри на метр* (Г/м, или Н/м) — *абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой при напряженности магнитного поля 1 А/м создается магнитная индукция 1 Т*.

Магнитный момент электрического тока, магнитный момент диполя p_M (L^2I) — это момент, создаваемый плоским контуром некоторой площади S , обтекаемым током I , т. е. $p_M = IS$. Единица — *ампер-квадратный метр* ($A \cdot m^2$, или $A \cdot m^2$).

Намагниченность, интенсивность намагничивания J ($L^{-1}I$), равная $J = p_M/V = IS/V$, где p_M — магнитный момент; V — объем. Единица — *ампер на метр* (А/м, или А/м) — *намагниченность, при которой вещество объемом 1 м³ имеет магнитный момент 1 А · м²*.

Магнитное сопротивление r_M, R_M ($L^{-2}M^{-1}T^2I^2$) — это магнитное сопротивление магнитной цепи, в которой магнитный поток Φ создается магнитодвижущей силой F , т. е. $R_M = F/\Phi$. Единица — *ампер на вебер* (А/Вб, или А/Вб).

Таблица 2

Единицы электрических и магнитных величин

Величина	Единица СГС	Значение в единицах СИ
Сила	дина	10^{-5} Н
Работа	эрг	10^{-7} Дж
Мощность	эрг/с	10^{-7} Вт
Количество электричества, заряд	ед СГС	$3,33564 \cdot 10^{-10}$ Кл
Объемная плотность электрического заряда	» »	$3,33564 \cdot 10^{-4}$ Кл/м ³
Поляризация, поверхностная плотность электрического заряда	» »	$3,33564 \cdot 10^{-6}$ Кл/м ²
Электрическое напряжение, э. д. с.	» »	299,7925 В
Электрическое смещение	» »	$0,265442 \cdot 10^{-6}$ Кл/м ²
Поток электрического смещения	» »	$0,265442 \cdot 10^{-10}$ Кл
Напряженность электрического поля	» »	$2,997925 \cdot 10^4$ В/м
Электрическая емкость	» »	$1,11265 \cdot 10^{-12}$ Ф
Сила электрического тока	» »	$3,33564 \cdot 10^{-10}$ А
Плотность электрического тока	» »	$3,33564 \cdot 10^{-6}$ А/м ²
Электрическое сопротивление	» »	$0,9898755 \cdot 10^{12}$ Ом
Удельное электрическое сопротивление	» »	$0,9898755 \cdot 10^{10}$ Ом · м
Электрическая проводимость	» »	$1,11265 \cdot 10^{-12}$ См
Удельная электрическая проводимость	» »	$1,11265 \cdot 10^{-10}$ См/м
Напряженность магнитного поля	эрстед	79,5775 А/м
Магнитная индукция	гаусс	10^{-4} Т
Магнитный поток	максвелл	10^{-8} Вб
Индуктивность (взаимная индуктивность)	ед. СГС	10^{-9} Г
Магнитодвижущая сила	гильберт	0,795775 А
Магнитное сопротивление	ед. СГС	$79,5775 \cdot 10^6$ А/Вб
Электрическая постоянная	безразмерная величина	$8,854186 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	» »	$1,256637 \cdot 10^{-6}$ Г/м

Магнитная проводимость g_m, G_m ($L^2MT^{-2}I^{-2}$). Единица — *вебер на ампер* (Вб/А, или Wb/A).

В электротехнике применяют три понятия мощности электрического тока с одной и той же размерностью (L^2MT^{-3}).

Полная мощность $S, P_s = UI$ определяется как произведение напряжения на зажимах цепи U на силу тока в ней I . Единица — *вольт-ампер* (В·А, или V·A).

Активная составляющая мощности (активная мощность) P соответствует той части полной мощности, которая вызвана переходом электромагнитной энергии цепи в какой-либо другой вид энергии — тепловую или механическую. Она равна среднему значению мгновенной мощности за период. Единица — *ватт* (Вт, или W).

Реактивная составляющая полной мощности (реактивная мощность) Q, P_q характеризует колебательные энергетические процессы в электромагнитных системах. Она равна $\sqrt{S^2 - P^2}$, если ток и напряжение цепи синусоидальны. Q берут со знаком плюс, если ток по фазе отстает от напряжения, и со знаком минус, если ток по фазе опережает напряжение. Единица — *вар* (вар, или var) — *реактивная мощность электрической цепи с синусоидальным переменным током при $\sin \varphi = 1$ и действующих значениях напряжения 1 В и силы тока 1 А*.

Соотношения между единицами СИ и системы СГС электрических и магнитных величин приведены в табл. 2.

§ 10.

Производные тепловые величины и их единицы

Количество теплоты Q (L^2MT^{-2}) — величина, эквивалентная некоторой работе A . Единица — *джоуль* (Дж, или J).

Внутренняя энергия системы U (L^2MT^{-2}) представляет собой энергию, которая зависит только от термодинамического состояния этой системы. Один грамм-моль идеального газа с числом степеней свободы i имеет $U = \frac{i}{2}RT$, где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура [14]. Единица — *джоуль*.

Газовая постоянная R ($L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$), равная $R = pV/T$. Единица — *джоуль на Кельвин* (Дж/К, или J/K).

Удельная газовая постоянная R_0 ($L^2T^{-2}\Theta^{-1}$), равная $R_0 = R/m$, где R — газовая постоянная, m — масса. Единица — *джоуль на килограмм-кельвин* (Дж/(кг·К), или J/(kg·K)) — *удельная газовая постоянная идеального газа массой 1 кг, совершающего при повышении температуры на 1 К и постоянном давлении работу 1 Дж*.

Работа расширения газа A (L^2MT^{-2}), равная $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$. Единица — *джоуль*.

Энтальпия J (L^2MT^{-2}) есть функция состояния системы, представляющая собой сумму внутренней энергии и потенциальной функции pV , т. е. $J = U + pV$. Единица — *джоуль*.

Теплоемкость системы C ($L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$), равная $C = Q/T$, где Q — приращение количества теплоты тела при изменении его температуры на T . Единица — *джоуль на кельвин* (Дж/К, или J/K) — *теплоемкость системы, повышающей температуру на 1 К при подведении к ней количества теплоты 1 Дж*.

Энтропия системы S ($L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$) — функция состояния системы, определяемая тем, что ее дифференциал dS при элементарном равновесном процессе равен отношению приращения количества теплоты dQ , сообщенной системе, к абсолютной температуре системы T , т. е. $dS = dQ/T$. Энтропия для обратимого изменения состояния

равна $S_N = \int_0^N dQ/T + S_0$, или $\Delta S = S_N - S_0 = \int_0^N dQ/T$,

где S_N — энтропия, отнесенная к состоянию N ; S_0 — энтропия, соответствующая начальному состоянию; $dQ = CdT$ (если теплоемкость C — величина постоянная в рассматриваемом интервале). Единица — *джоуль на кельвин* (Дж/К, или J/K) — *изменение энтропии системы в процессе, в котором при средней температуре n К ей сообщается количество теплоты n Дж (n — число положительных)*.

Удельная энтропия s_N , **удельная теплоемкость** c ($L^2T^{-2}\Theta^{-1}$) соответственно равны $s_N = S_N/m$; $c = C/m$. Единица — *джоуль на килограмм-кельвин* (Дж/(кг·К), или J/(kg·K)).

Тепловой поток Φ_T (L^2MT^{-3}) — отношение количества теплоты, проходящего через поверхность, к времени, т. е. $\Phi_T = Q/t$. Единица — *ватт* (Вт, или W).

Поверхностная плотность теплового потока (MT^{-3}) — это отношение теплового потока к поверхности, нормальной к его направлению. Единица — *ватт на квадратный метр* ($Вт/м^2$, или W/m^2) — *поверхностная плотность теплового потока* 1 Вт, равномерно распределенного по поверхности площадью 1 м².

Коэффициент теплообмена (теплоотдачи) α , коэффициент теплопередачи k ($MT^{-3}\Theta^{-1}$). Первая величина характеризует интенсивность теплоотдачи и равна удельному тепловому потоку φ_T через поверхность твердой стенки S , отнесенному к единице температурного напора между стенкой и жидкостью, т. е. $\alpha = \varphi_T/S$, где T — температурный напор, К [21]. Коэффициент теплопередачи равен тому же отношению, но в данном случае имеется в виду температурный напор между жидкостями, разделенными стенкой.

Единица — *ватт на квадратный метр-кельвин* ($Вт/(м^2 \cdot К)$, или $W/(m^2 \cdot K)$).

Температурный градиент $grad T$ ($L^{-1}\Theta$) — вектор, модуль которого равен производной от температуры по нормали к изотермической поверхности в данной точке и направленный в сторону возрастания температуры. Единица — *кельвин на метр* ($К/м$, или K/m).

Теплопроводность λ ($LMT^{-3}\Theta^{-1}$) — это физический параметр, характеризующий способность вещества проводить теплоту и равный отношению удельного теплового потока φ_T к абсолютной величине температурного градиента, т. е.

$$\lambda = \frac{\varphi_T}{grad T} = \frac{Ql}{TSt},$$

где T — разность температур двух сечений тела, состоящих на расстоянии l ; t — время [21]. Единица — *ватт на метр-кельвин* ($Вт/(м \cdot К)$, или $W/(m \cdot K)$).

Температуропроводность a (L^2T^{-1}) — физический параметр, характеризующий скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности и равный отношению коэффициента теплопроводности λ к удельной объемной теплоемкости c_V :

$$a = \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial grad T}{\partial l}, \quad \text{или} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_V} = \frac{\lambda}{c_V},$$

где T — температура, К; ρ — плотность, $кг/м^3$. Единица — *квадратный метр на секунду* ($м^2/с$, или m^2/s) —

температуропроводность вещества с теплопроводностью 1 Вт/(м·К), удельной теплоемкостью (при постоянном давлении) 1 Дж/(кг·К) и плотностью 1 кг/м³.

§ 11.

Производные лучистые и световые величины оптического излучения и их единицы

Световой поток Φ (J), определяющий мощность светового излучения, оцениваемую по световому ощущению, равен $\Phi = I\Omega$, где I — сила света; Ω — телесный угол. Единица — *люмен* (лм, или lm) — *световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.*

Световая энергия W (TJ) равна произведению светового потока на время t его действия. Единица — *люмен-секунда* (лм·с, или lm·s).

Светимость R ($L^{-2}J$) — поверхностная плотность светового потока, испускаемого светящейся поверхностью, равная отношению светового потока к площади S этой поверхности. Единица — *люмен на квадратный метр* (лм/м², или lm/m²) — *светимость поверхности площадью 1 м², испускающей световой поток 1 лм.*

Освещенность E ($L^{-2}J$) — поверхностная плотность светового потока Φ , падающего на поверхность S , равная $E = \Phi/S$. Единица — *люкс* (лк, или lx) — *освещенность поверхности площадью 1 м² при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм.*

Световая экспозиция H ($L^{-2}TJ$). Единица — *люкс-секунда* (лк·с, или lx·s) — *световая экспозиция, создаваемая в течение 1 с при освещенности 1 лк.*

Яркость B ($L^{-2}J$) — отношение силы света в данном направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению, т. е.

$$B = \frac{dJ}{dS \cos \alpha},$$

где dS — площадь светящейся поверхности (испускающей, отражающей или пропускающей свет); α — угол между нормалью к светящейся поверхности и направлением силы света. Единица — *кандела на квадратный метр* (кд/м², или cd/m²).

Таблица 3

Единицы лучистых и световых величин оптического излучения

Величина	Единица СИ световой величины	Единица лучистой величины		
		СИ	системы СГС	Значение в единицах СИ
Сила света (Сила излучения)	кандела	ватт на стерадиан	эрг в секунду на стерадиан (эрг/(с · ср), erg/(s · sr))	10^{-7} Вт/ср
Световой поток (Поток излучения)	люмен	ватт	эрг в секунду (эрг/с, erg/s)	10^{-7} Вт
Световая энергия (Энергия излучения)	люмен-секунда	джоуль	эрг (эрг, erg)	10^{-7} Дж
Светимость (Излучательность)	люмен на квадратный метр	ватт на квадратный метр	эрг в секунду на квадратный сантиметр (эрг/(с · см ²), erg/(s · cm ²))	10^{-3} Вт/м ²
Яркость (Лучистость)	кандела на квадратный метр	ватт на квадратный метр-стерадиан	эрг в секунду на квадратный сантиметр-стерадиан (эрг/(см ² · ср), erg/(cm ² · sr))	10^{-3} Вт/(ср · м ²)
Освещенность (Облученность)	люкс	ватт на квадратный метр	эрг в секунду на квадратный сантиметр (эрг/(с · см ²), erg/(s · cm ²))	10^{-3} Вт/м ²
Количество освещения (Лучистая экспозиция) (Функция распределения по мощности)	люкс-секунда	джоуль на квадратный метр	эрг на квадратный сантиметр (эрг/см ² , erg/cm ²)	10^{-3} Дж/м ²
	—	ватт на метр	эрг в секунду на сантиметр (эрг/(с · см), erg/(s · cm))	10^{-5} Вт/м
Световой эквивалент потока излучения, или видность	люмен на ватт	—	—	—

Продолжение табл. 3

Величина	Единица СИ световой величины	Единица лучистой величины		
		СИ	системы СГС	Значение в единицах СИ
(Спектральная плотность энергии излучения по длине волны)	—	джоуль на метр	эрг на сантиметр (эрг/см, erg/cm)	10^{-5} Дж/м
(Спектральная плотность энергии излучения по частоте)	—	джоуль на герц	эрг на герц (эрг/Гц, erg/Hz)	10^{-7} Дж/Гц

Ниже приведены единицы энергетических величин.

Энергия излучения W (L^2MT^{-2}) — энергия, переносимая электромагнитными волнами. Единица — *джоуль* (Дж, или *J*).

Поток излучения Φ_0 (L^2MT^{-3}) — отношение энергии излучения, переносимой сквозь заданную поверхность, к времени. Единица — *ватт* (Вт, или *W*).

Спектральная плотность энергии излучения S_λ (LMT^{-2} — по длине волны или L^2MT^{-1} — по частоте) — отношение энергии, измеренной в рассматриваемом диапазоне, к его промежутку. Единицы — *джоуль на метр* (Дж/м, или *J/m*), *джоуль на герц* (Дж/Гц, или *J/Hz*).

Поверхностная плотность потока излучения (MT^{-3}) — отношение потока излучения к площади поверхности. Единица — *ватт на квадратный метр* (Вт/м², или *W/m²*).

Излучательность R_0 (MT^{-3}) — поверхностная плотность потока излучения, испускаемого с данной поверхности. Единица — *ватт на квадратный метр* (Вт/м², или *W/m²*).

Облученность E_0 (MT^{-3}) — поверхностная плотность потока излучения, падающего на данную поверхность. Единица — *ватт на квадратный метр* (Вт/м², или *W/m²*).

Энергетическая экспозиция (лучистая экспозиция) H_0 (MT^{-2}). Единица — джоуль на квадратный метр ($Дж/м^2$, или J/m^2).

Сила излучения J_0 (L^2MT^{-3}) — отношение потока излучения источника к телесному углу, в пределах которого излучение распространяется. Единица — ватт на стерадиан ($Вт/ср$, или W/sr).

Энергетическая яркость B_0 (MT^{-3}) — отношение энергетической силы света J_0 элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения. Единица — ватт на стерадиан-квадратный метр ($Вт/(ср \cdot м^2)$, или $W/(sr \cdot m^2)$).

(В связи с созданием новых световых эталонов, основанных на так называемом полном излучателе, выяснилось, что применяемые прежде единицы — международная свеча, люмен, радлюкс, люкс, децимиллистильб в 1,005 раз меньше соответствующих им новых единиц — кандели, люмена, единицы светности, люкса, кандели на квадратный метр.)

Соотношения между единицами СИ и системы СГС лучистых величин (указаны в скобках) и световых величин оптического излучения приведены в табл. 3.

§ 12.

Производные акустические величины и их единицы

Звуковое давление p ($L^{-1}MT^{-2}$) — давление среды, обусловленное акустическими колебаниями. Единица — паскаль ($Па$, или Pa).

Колебательная скорость ξ (LT^{-1}), равная $\xi = \xi_{\max} \omega \cos \omega(t - \frac{y}{c})$, где ξ_{\max} — амплитуда перемещения частиц; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; y — расстояние колеблющейся частицы от источника колебания; c — скорость распространения колебаний; $\omega y/c$ — начальная фаза колебаний; $\omega(t - y/c)$ — фаза колебаний [19]. Единица — метр в секунду ($м/с$, или m/s).

Объемная скорость v_0 (L^3T^{-1}), равная произведению ξS , где S — сечение канала, в котором распространяется звук. Единица — кубический метр в секунду ($м^3/с$, или

$м^3/с$) — объемная скорость звука при колебательной скорости 1 м/с и площади поперечного сечения канала 1 м².

Акустическое сопротивление R_a ($L^{-4}MT^{-1}$) — отношение звукового давления к объемной скорости. Единица — паскаль-секунда на кубический метр ($Па \cdot с/м^3$, или $Pa \cdot s/m^3$) — акустическое сопротивление канала, в котором объемная скорость 1 м³/с создается при звуковом давлении 1 Па.

Удельное акустическое сопротивление ρ_a ($L^{-2}MT^{-1}$), равное $\rho_a = R_a/S$. Единица — паскаль-секунда на метр ($Па \cdot с/м$, или $Pa \cdot s/m$).

Механическое сопротивление Z_m (MT^{-1}), определяемое как отношение силы F , действующей на площадь S канала в направлении скорости, к колебательной скорости ξ и равное

$$Z_m = \frac{F}{\xi} = \frac{pS}{\xi},$$

где p — звуковое давление. Единица — ньютон-секунда на метр ($Н \cdot с/м$, или $N \cdot s/m$) — механическое сопротивление канала, в котором колебательная скорость 1 м/с возникает при силе 1 Н.

Таблица 4

Единицы акустических величин

Величина	Единица СИ	Единица системы СГС	Значение в единицах СИ
Звуковое давление	паскаль	дина на квадратный сантиметр	10^{-1} Па
Плотность звуковой энергии (объемная)	джоуль на кубический метр	эрг на кубический сантиметр	10^{-1} Дж/м ²
Интенсивность звука (поверхностная плотность звуковой энергии)	ватт на квадратный метр	эрг в секунду на квадратный сантиметр	10^{-3} Вт/м ²
Объемная скорость звука	кубический метр в секунду	кубический сантиметр в секунду	10^{-6} м ³ /с
Акустическое сопротивление	паскаль-секунда на кубический метр	дина-секунда на сантиметр в пятой степени	10^4 Па·с/м ³
Механическое сопротивление	ньютон-секунда на метр	дина-секунда на сантиметр	10^{-3} Н·с/м
Удельное акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр	дина-секунда на кубический сантиметр	10 Па·с/м
Звуковая энергия	джоуль	эрг	10^{-7} Дж
Поток звуковой энергии	ватт	эрг в секунду	10^{-7} Вт

Звуковая энергия (L^2MT^{-2}) имеет две составляющие: потенциальную энергию упругой деформации среды и кинетическую энергию колеблющихся частиц. Единица — *джоуль* (Дж, или J).

Поток звуковой энергии (L^2MT^{-3}) есть отношение энергии, переносимой через площадку S , перпендикулярную направлению распространения звуковой волны, к времени. Единица — *ватт* (Вт, или W).

Плотность звуковой энергии ($L^{-1}MT^{-2}$) — отношение энергии к объему среды, в которой действуют звуковые колебания. Единица — *джоуль на кубический метр* (Дж/м³, или J/м³).

Плотность потока звуковой энергии, или интенсивность звука I (MT^{-3}) — отношение потока энергии, проходящей через поверхность, перпендикулярную направлению потока, к площади этой поверхности. Единица — *ватт на квадратный метр* (Вт/м², или W/м²) — *интенсивность звука, при которой через поверхность площадью 1 м², перпендикулярную направлению распространения звука, передается поток звуковой энергии 1 Вт.*

Соотношения между единицами СИ и системы СГС показаны в табл. 4.

§ 13.

Производные величины в области ионизирующих излучений и их единицы

Активность нуклида в радиоактивном источнике, активность изотопа (T^{-1}) выражаются числом актов распада источника в секунду. Единица — *секунда в минус первой степени* (s^{-1} , или s^{-1}).

Интенсивность излучения (MT^{-3}) оценивается отношением мощности направленного излучения через поверхность, перпендикулярную направлению распространения излучения, к площади этой поверхности. Она равна

$$J = \frac{ANW_0}{4\pi r^2},$$

где A — активность излучения; N — число квантов или частиц, излучаемых в одном акте распада; W_0 — сред-

няя энергия частицы. Единица — *ватт на квадратный метр* (Вт/м², или W/м²).

Период полураспада T (T) определяют из известной формулы $A = A_0 e^{-\lambda T}$, где A — активность по истечении времени T ; A_0 — начальная активность; λ — постоянная распада; e — основание натуральных логарифмов. Если $A = 0,5 A_0$, то $T = \ln 2/\lambda = 0,693/\lambda$. Единица — *секунда* (с, или s).

Энергия ионизирующего излучения (L^2MT^{-2}). Единица — *джоуль* (Дж, или J), эквивалентная механической работе 1 Дж.

Доза излучения (или поглощенная доза) D (L^2T^{-2}) — отношение энергии W к массе облучаемого вещества m . Единица — *джоуль на килограмм* (Дж/кг, или J/kg) — *доза излучения, при которой массе облученного вещества 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.*

Мощность дозы излучения (L^2T^{-3}). Единица — *ватт на килограмм* (Вт/кг, или W/kg) — *мощность, при которой за время 1 с поглощенная доза возрастает на 1 Дж.*

Эквивалентная доза излучения (L^2T^{-2}) оценивается по биологическому действию. Единица — *джоуль на килограмм* (Дж/кг, или J/kg).

Экспозиционная доза фотонного, рентгеновского и гамма-излучения ($M^{-1}TI$) представляет собой энергетическую характеристику излучения, оцениваемую по эффекту ионизации сухого атмосферного воздуха. Единица — *кулон на килограмм* (Кл/кг, или C/kg) — *экспозиционная доза фотонного, рентгеновского или гамма-излучения, при которой сумма электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных электронами, освобожденными в облученном воздухе массой 1 кг при полном использовании ионизирующей способности, равна 1 Кл.*

Мощность экспозиционной дозы ($M^{-1}I$). Единица — *ампер на килограмм* (А/кг, или A/kg) — *мощность экспозиционной дозы фотонного излучения, при которой за время 1 с экспозиционная доза возрастает на 1 Кл/кг.*

Керма (L^2T^{-2}). Единица — *джоуль на килограмм* (Дж/кг, или J/kg) — *керма, при которой сумма первоначальных кинетических энергий всех заряженных частиц, образованных косвенно ионизирующим излучением в облученном веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.*

Мощность кермы (L^2T^{-3}). Единица — *ватт на килограмм* (Вт/кг, или W/kg).

**Г Л А В А 4. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ
И ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СГС,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

§ 14.

Кратные и дольные единицы

В современной науке и технике встречаются физические величины самых различных размеров, например, радиус нашей Галактики имеет порядок 10^{18} м, а радиус электрона 10^{-15} м, длина радиоволн 10^4 — 10^{-3} м, а длина волн излучений 10^{-11} — 10^{-14} м, масса Солнца 10^{27} кг, а масса электрона 10^{-31} кг, период полураспада Pu^{239} 10^{10} с, а период обращения протона и нейтрона в ядре 10^{-20} с.

Размер основных и производных единиц, образующих системы, не всегда удобен для вычислений. Поэтому наряду с системными единицами целесообразно ввести такие единицы, которые были бы удобны для практического использования. Этот способ образования единиц был применен еще при введении метрической системы. В метрической системе установлена десятичная зависимость между большими и малыми единицами. Эта зависимость в дальнейшем была использована и в других системах единиц. Новые единицы, образованные по десятичной системе, равняются исходной основной или производной единице системы, умноженной на коэффициент 10^n , где n — целое число. Если n больше нуля, то такую новую единицу принято называть кратной (10 , 10^2 , 10^3 и т. п.), если n меньше нуля — дольной (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} и т. п.).

Подобные единицы получили наименования, образованные присоединением специальной приставки к наименованию исходной единицы. Сами приставки имеют греческое, латинское и французское происхождение. Диапазон изменения размера единиц с помощью приставок — от 10^{-18} до 10^{12} по отношению к исходным.

Так как связь между образованными указанным способом единицами и исходными устанавливается посредством коэффициентов, больших или меньших 1, то эти единицы нельзя считать когерентными.

В документе [43] указаны правила применения и обозначения множителей и приставок для образования десятичных кратных и дольных единиц, а также даны наименования последних (табл. 5).

Таблица 5

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	Т	Т
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г	Г
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	М	М
$1\ 000 = 10^3$	кило	к	к
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	атто	а	a

Некоторые из этих правил устанавливают следующее: приставку пишут слитно с наименованием исходной единицы, например, сантиметр, киловольт, мегагерц, микрометр; в сложном наименовании единицы приставку присоединяют к наименованию первой единицы, например, киловольт-ампер ($1\ \text{кВ} \cdot \text{А} = 10^3\ \text{В} \cdot \text{А}$), меганьютон-метр ($1\ \text{МН} \cdot \text{м} = 10^6\ \text{Н} \cdot \text{м}$); если наименование единицы представляет собой отношение единиц, то приставку присоединяют к числителю, например, киловольт на ампер (кВб/А, а не Вб/мА), килоджоуль на кельвин (кДж/К, а не Дж/мК). При сложном наименовании единицы, образованном как сочетание единиц с кратной или дольной единицами длины, площади, объема допускает-

ся применять приставки во втором множителе или знаменателе, например, В/см, А/см², т·км.

Для образования наименования десятичной кратной или дольной единицы от основной единицы СИ — килограмма следует приставку присоединять к наименованию «грамм», например, миллиграмм, мегаграмм.

Приставки следует применять не в промежуточных стадиях расчетов, а лишь в их конечных результатах. В промежуточных стадиях необходимо использовать единицы СИ. Это упрощает запись и процесс расчета.

Подобная задача часто возникает при расчете электропривода.

Пример 10. Определить момент M и мощность P на валу электродвигателя грузовой лебедки при подъеме груза весом $G = 5$ т с скоростью $v = 60$ м/мин. Диаметр грузового барабана $D = 500$ мм, передаточное число между барабаном и электродвигателем $i = 25$, а к. п. д. механизма $\eta = 0,8$.

В примере использованы единицы разных систем. Все величины выразим в единицах СИ: вместо веса введем понятие массы m , которая в данном случае равна 5000 кг; диаметр $D = 0,5$ м; скорость $v = 1$ м/с.

Статический момент на валу электродвигателя, выраженный в Н·м, равен

$$M = \frac{mgD}{2i\eta} = \frac{5000 \cdot 9,81 \cdot 0,5}{2 \cdot 25 \cdot 0,8} = 613.$$

Угловая скорость вала электродвигателя, выраженная в рад/с,

$$\omega = \frac{2vi}{\pi D} = \frac{1 \cdot 25 \cdot 2}{3,14 \cdot 0,5} \approx 31,8.$$

Мощность P на валу электродвигателя равна $P = 613 \cdot 31,8 = 19483$ Вт. Используя кратную единицу, получаем $P = 19,5$ кВт.

§ 15.

Внесистемные единицы

Наряду с единицами Международной системы в настоящее время широко применяются различные внесистемные единицы. Некоторые из них в дальнейшем будут допущены к применению наравне с единицами СИ, другие предполагается изъять с 1 января 1975 г. К первым относятся единицы: массы — тонна; времени — минута, час, сутки; плоского угла — градус, минута, секунда; площади — гектар; объема — литр, а также безразмерные единицы — процент, промилле и миллионная доля,

единица температуры Цельсия, логарифмические единицы — бел и децибел, единицы частотного интервала — октава и декада.

К числу предполагаемых к изъятию с 1 января 1975 г. относятся единицы: длины — ангстрем; массы — карат и центнер; силы — килограмм-сила; веса — тонна-сила; давления — килограмм-сила на квадратный сантиметр, миллиметр водяного столба, миллиметр ртутного столба; напряжения (механического) — килограмм-сила на квадратный миллиметр; мощности — лошадиная сила; удельного электрического сопротивления — ом-квадратный миллиметр на метр, а также тепловые единицы, основанные на калории, внесистемные единицы ионизирующих излучений — рад, рентген, кюри, бэр, рад в секунду, бэр в секунду и единица логарифмической величины — непер.

Порядок использования единиц, допускаемых к применению наравне с единицами СИ, и временно допускаемых, который изложен в п. 2 документа [43], сводится к следующему.

Во вновь разрабатываемых или пересматриваемых стандартах всех видов должны применяться единицы СИ и допускаемые наравне с ними. В необходимых случаях разрешено приводить значения величин в единицах, временно допускаемых к применению, указывая их в скобках, в отдельной графе и на параллельной шкале графика или диаграммы.

Вновь утверждаемые государственные стандарты на средства измерений должны предусматривать их градуировку как в единицах СИ или кратных и дольных от них, так и в ранее применявшихся единицах при условии ограничения срока действия стандарта сроком, предусмотренным для временно допускаемых единиц.

Во всех учебных заведениях, в издаваемой научно-технической, общественно-политической и экономической литературе, а также в нормативно-технической документации следует применять единицы СИ и допускаемые наравне с ними. В литературе по физике и астрономии допускается применять единицы СГС и некоторые другие единицы, указанные ниже.

Единицы, применяемые в специальных разделах физики и астрономии. К числу таких единиц относятся единицы длины, энергии и ионизирующих излучений. Единица длины, называемая *икс-единицей* (икс-ед, или

х), находит применение в атомной и рентгеновской технике. Вначале икс-единица была принята равной 10^{-11} см, однако более точное измерение этой единицы в рентгеновской спектроскопии показало, что она равна $1,00206 \cdot 10^{-13}$ м.

Астрономическая единица (а. е., или УА) равна среднему расстоянию от Земли до Солнца, т. е. $1,49600 \cdot 10^{11}$ м.

Световой год (св. год, или л. у.) — расстояние, которое проходит свет за один год (1 св. год = $9,4605 \times 10^{15}$ м).

Парсек (пк, или pc) — расстояние, с которого полуциаметр земной орбиты виден под углом в одну угловую секунду; 1 ПК = $3,086 \cdot 10^{16}$ м.

Барн (б, или b) — единица площади эффективного поперечного сечения ядерных процессов. Геометрические сечения атомных ядер имеют порядок 1 барн; 1 б = 10^{-28} м² [26, 43].

Единицей энергии и работы является *электронвольт* (эВ, или eV). В основе определения этой единицы лежит понятие работы и энергии заряда электрона при движении его в электрическом поле. Заряд электрона равен $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электронвольт — это изменение энергии $\Delta A = 1,60219 \cdot 10^{19}$ Дж электрона, проходящего в электрическом поле, потенциал которого $V = 1$ В.

Один *килоэлектронвольт* (кэВ, или keV) равен $1,60219 \cdot 10^{-16}$ Дж, один *мегаэлектронвольт* (МэВ, или MeV) составляет $1,60219 \cdot 10^{-13}$ Дж.

В области ионизирующих излучений величины выражают в следующих единицах: активность нуклида — *распад в секунду* (расп./с), поток ионизирующих частиц — *частица в секунду* (част./с), плотность потока ионизирующих частиц — *частица в секунду на квадратный метр* (част./с·м²).

Логарифмические единицы. Эти единицы характеризуют относительную интенсивность измеряемых величин. К числу подобных единиц относятся уровень звукового давления p , громкость L и интенсивность звука J , а также логарифмы отношений одноименных физических величин. Если принять некоторые значения p_0 , L_0 и J_0 акустических величин за пороговые, то уровень или, точнее, разность уровней можно выразить как логарифм отноше-

ния данного значения величин p , L и J к их пороговому значению, т. е.

$$\lg(p/p_0), \lg(L/L_0) \text{ и } \lg(J/J_0).$$

Уровень интенсивности звука равен $L_J = k_1 \lg(J/J_0)$. Эквивалентная уровню L_J разность уровней звуковых давлений равна $L_p = k_2 \lg(p/p_0)$. Если принять $k_1 = 1$, то $k_2 = 2$, так как между интенсивностью J и звуковым давлением p существует зависимость вида $J = p^2(\rho c)$ (см. § 12) и $L_p = 2 \lg(p/p_0)$.

Уровни звуковых величин выражают в *белах* (Б, или В), *децибелах* (дБ, или dB) и *неперах* (Нп, или Np). Численное значение 1 Б определяется следующим образом:

$$1 \text{ Б} = \lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \text{ при } \frac{p_2}{p_1} = 10,$$

если p_2 и p_1 — одноименные энергетические величины (мощность, энергия, интенсивность звука и т. п.);

$$1 \text{ Б} = 2 \lg\left(\frac{F_2}{F_1}\right) \text{ при } \frac{F_2}{F_1} = 10,$$

если F_2 и F_1 — одноименные «силовые» величины (давление, сила тока, напряжение и т. п.). Следовательно, в белах

$$L_J = \lg\left(\frac{J_1}{J_0}\right); L_p = 2 \lg\left(\frac{p_1}{p_0}\right).$$

Пороговое значение звукового давления принято равным $2 \cdot 10^{-5}$ Па, и $L_p = 2 \lg(p_1/2 \cdot 10^{-5})$. Децибелом называют десятую часть бела. Звуковое давление в децибелах выражается следующей формулой: $L_p = 20 \lg(p_1/2 \cdot 10^{-5})$.

Логарифмическая единица непер определяется из формулы $1 \text{ Нп} = \ln(F_2/F_1)$ при $F_2/F_1 = e$, где e — основание натурального логарифма; 1 Нп = 0,8686 Б.

Человеческое ухо воспринимает акустические колебания в воздухе в диапазоне частот $20—20 \cdot 10^3$ Гц. Наибольшей слышимостью обладают колебания частотой $1000—3000$ Гц, их называют звуковыми. Колебания с частотой ниже 20 Гц называют инфразвуковыми, а с частотой выше $20 \cdot 10^3$ Гц — ультразвуковыми.

Применительно к слуховым ощущениям исходной акустической величиной принимают звук частотой 1000 Гц.

Уровень громкости L_N при $f = 1000$ Гц определится из формулы $L_N = 10 \lg(J/J_0)$, или $L_N = 20 \lg(p/p_0)$.

Если в этой формуле принять, что уровень звукового давления равен 1 дБ, то уровень громкости станет равным 1 фону. Таким образом, громкость в 1 фон представляет собой такой уровень громкости, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частоты 1000 Гц равен 1 дБ.

Единицей частотного интервала является *октава*. Интервал между двумя частотами равен 1 октаве, если логарифм их отношения с основанием 2 равен единице, т. е. 1 октава = $\log_2(f_2/f_1)$ при $f_2 = 2f_1$. В диапазоне частот $20-20 \cdot 10^3$ Гц содержится около 10 октав; 1 декада = $\lg(f_2/f_1)$ при $f_2/f_1 = 10$.

В теории информации используют единицу *бит* (bit) — количество информации, получаемое при осуществлении одного из двух равновероятных событий. Количество информации вычисляют по двоичной системе, в которой за основание логарифмов принято число 2, т. е. 1 бит = $\log_2(x_2/x_1)$, если $x_2 = 2x_1$.

Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68). Внесистемная единица температуры градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), широко применяемая в современной технике и науке, по размеру равна кельвину. Поэтому в одной и той же температурной шкале разность температур, выраженная в кельвинах, равна разности температур в градусах Цельсия.

В настоящее время наряду с термодинамической шкалой в науке и практических исследованиях используют Международную практическую температурную шкалу 1968 г., принятую Международным комитетом мер и весов на сессии 1968 г. на основании полномочий XIII Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся в 1967 г. [28].

Эта шкала основана на значениях температур, соответствующих некоторым воспроизводимым состояниям равновесия между фазами чистых веществ.

В МПТШ-68 различают международную практическую температуру Кельвина (символ T_{68}) и международную практическую температуру Цельсия (символ t_{68}). Связь между этими температурами определяет формула $t_{68} = T_{68} - 273,15 \text{ К}$.

Единицей T_{68} является кельвин (К), а единицей t_{68} — градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

Определяющие постоянные точки МПТШ-68 дают возможность наиболее точно воспроизвести температуру. Промежуточные значения температур определяются эталонными приборами. Так, в диапазоне между 13,81 К и 630,74 $^{\circ}\text{C}$ в качестве эталонного прибора применяют платиновый термометр сопротивления, элемент сопротивления которого изготовлен из чистой платины, отожженной и свободной от натяжения. Отношение сопротивлений, определяемое выражением $W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15 \text{ К})$, не должно быть меньше 1,39250 при $T_{68} = 373,15 \text{ К}$.

Таблица

Определяющие постоянные точки МПТШ-68

Состояние равновесия	Присвоенные значения МПТШ-68	
	$T_{68}, \text{ К}$	$t_{68}, ^{\circ}\text{C}$
Между твердой, жидкой и газообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	-259,34
Между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода при давлении 33 330,6 Па (25/76 нормальная атмосфера)	17,042	-256,108
Между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28	-252,87
Между жидкой и газообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	-246,048
Между твердой, жидкой и газообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	-218,789
Между жидкой и газообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	-182,962
Между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды) ¹	273,16	0,01
Между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды) ²	373,15	100
Между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43

¹ Применяемая вода должна иметь изотопический состав воды океанов.

² Вместо точки кипения воды можно применять состояние равновесия между твердой и жидкой фазами олова (точку затвердевания олова) с присвоенным значением $t_{68} = 231,968 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ниже 0 $^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления — температура термометра определяют с помощью основной функции

и специфицированных функций отклонения. В интервале $0^{\circ}\text{C} - 630,74^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления от температуры определяют два полинома.

Между $630,74^{\circ}\text{C}$ и $1064,43^{\circ}\text{C}$ эталонным прибором служит терморезистор платинородий ($90\% \text{ Pt} + 10\% \text{ Rh}$) — платина, для которой зависимость электродвижущая сила — температура представлена уравнением второй степени.

Выше $1337,58 \text{ K}$ ($1064,43^{\circ}\text{C}$) Международную практическую температурную шкалу определяют с помощью закона излучения Планка при $T = 1337,58 \text{ K}$ в качестве исходной температуры и значения второй постоянной $c_2 = hc/k = 0,014388 \text{ м}\cdot\text{К}$, где h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; k — постоянная Больцмана.

Формула Планка имеет вид

$$r_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1},$$

где $r_{\lambda T}$ — излучательная способность абсолютно черного тела, являющаяся функцией длины волны λ и абсолютной температуры T ; $c_1 = 2\pi hc^2 = 3,74150 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$. Практически закон Планка реализуется посредством монохроматического оптического пирометра.

Определяющие постоянные точки МПТШ-68 приведены в табл. 6. За исключением тройных точек и одной точки равновесного водорода ($17,042 \text{ K}$) присвоенные значения температур, указанные в этой таблице, действительны для состояний равновесия при давлении $101\,325 \text{ Па}$ (нормальная атмосфера).

При воспроизведении этих постоянных точек могут возникнуть малые отклонения от присвоенных температур, вызванные разной глубиной погружения термометров и неточной реализацией предписанного давления. Если эти малые отклонения будут учтены, точность воспроизведения шкалы не снизится.

§ 16.

Единицы системы СГС

В учебной и научной литературе до сих пор употребляются единицы системы СГС. Как известно, основные единицы этой системы — сантиметр, грамм, секунда.

Производные единицы системы СГС образованы по тому же принципу, что и единицы СИ. Из механических единиц системы СГС специальные названия имеют единицы: силы — дина, работы — эрг, динамической вязкости — пуаз, кинематической вязкости — стокс.

Пуаз (П, или Р) — динамическая вязкость среды, при ламинарном течении которой в слоях, располагающихся на расстоянии 1 см в направлении, перпендикулярном течению, под действием давления сдвига, равном $1 \text{ дин}/\text{см}^2$, возникает разность скоростей $1 \text{ см}/\text{с}$; $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Стокс (Ст, или St) представляет собой кинематическую вязкость среды плотностью $1 \text{ г}/\text{см}^3$ и динамической вязкостью 1 П ; $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Остальным единицам механических величин в системе СГС специальных названий не присвоено.

Тепловые единицы системы СГС образованы из единицы работы эрг и единицы температуры кельвин, например, единица количества теплоты — эрг, энтропии — эрг на кельвин.

Единицы излучения также основаны на единице работы эрг, например, единица потока излучения — эрг в секунду.

В основу акустических единиц системы СГС положена единица силы дина (дин, или dyn).

Электрические единицы симметричной системы СГС совпадают с единицами абсолютной электростатической системы СГСЭ, в которой единицу заряда Q определяют из закона Кулона, а затем на основе этой единицы определяют другие: силы тока, электрического смещения, потенциала и пр.

Магнитные единицы системы СГС, совпадающие с единицами абсолютной электромагнитной системы СГСМ, можно найти несколькими способами, используя закон Кулона для магнитных масс, закон Био — Савара — Лапласа или закон Ампера. Эти законы позволяют определить напряженность магнитного поля H . В симметричной системе Гаусса напряженность магнитного поля измеряется в единицах системы СГСМ и поэтому в формулах, где одновременно фигурируют магнитные и электрические величины, неизбежны переводные коэффициенты, так как электрическая ϵ_0 и магнитная μ_0 постоянные в системе СГС — безразмерные величины, равные единице.

Как известно, по Максвеллу между постоянными ϵ_0 , μ_0 и электродинамической постоянной, равной по значению скорости света, существует связь вида $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ и так как $\mu_0 = \epsilon_0 = 1$, то во всех формулах, где встречаются одновременно электрические и магнитные единицы в системе СГС, обязательно будет присутствовать коэффициент $1/c^n$ (8, 9, 21, 23, 24), причем $c = 2,997925 \cdot 10^{10}$ см/с.

Магнитные единицы системы СГС можно определить, пользуясь следующим выражением для момента M , действующего на рамку с током в поле индукции:

$$B = \frac{cM}{IS \cos \varphi},$$

где момент M выражен в дин·см; ток I — в единицах СГС; площадь S — в см².

Магнитный поток равен $\Phi = \int B dS \cos(\widehat{B}, dn)$, где n — направление нормали к поверхности площадью S .

Единицы некоторых электрических и магнитных величин в системе СГС имеют специальные наименования. Размер единиц системы СГС для практических расчетов в большинстве случаев неудобен. Так, напряжение электрических цепей, обычно имеющее значения единиц, десятков или сотен вольт, в системе СГС выражалось бы долями единиц, так как 1 В равен 1/300 ед. СГС.

Ниже показано, как устанавливается связь между некоторыми электрическими и магнитными единицами систем СГС и Международной. Физические величины в приведенных ниже формулах представлены соответствующим числом единиц. Например, зависимость, выражающую закон Ампера в системе СГС,

$$F = \frac{2\mu_0 I_1 I_2 l}{a},$$

следует понимать так: число единиц силы взаимодействия F токов двух проводов равно двойному произведению числа единиц магнитной постоянной μ_0 на произведение чисел единиц токов I_1 и I_2 в проводах и число единиц, выражающих длину l проводов, деленных на число единиц расстояния a между проводами. Размер единиц обратно пропорционален числу, выражающему значение величины.

Найдем связь между числами единиц величин, выраженных в СИ и симметричной системы СГС, а затем установим связь между размерами этих единиц.

Напишем предыдущую формулу, выражающую закон механического взаимодействия между проводами, применительно к единицам системы СГСМ в вакууме, для упрощения приняв числовые значения длины участка проводов l и расстояния между ними a одинаковыми и $I_1 = I_2 = 1$. Так как магнитная постоянная в системе СГСМ $\mu_{01} = 1$, то числовое значение силы равно $F = 2I_{эм}^2$.

В симметричной системе $F = 2I_0/c^2$, где I_0 — числовое значение силы тока в электростатических единицах.

Следовательно, число единиц силы тока $I_{эм}$ в системе СГСМ будет равно $c \cdot I_0$, а одна единица силы тока в системе СГС будет равна $1/c$ единиц силы тока в системе СГСМ, т. е. 1 ед. СГСЭ = $1/c$ ед. СГСМ.

Так как 1 А = 0,1 ед. СГСМ, то 1 ед. СГС_I = $10/c$ А.

Единица времени секунда одна и та же во всех системах электрических и магнитных единиц, поэтому единица заряда Q системы СГС 1 ед. СГС_Q = $10/c$ Кл.

Соотношение между единицами напряжения 1 ед. СГС_U в системе СГС и 1 В в СИ легко найти из уравнения $U = A/Q$.

Если работа A выражена в джоулях, заряд Q — в кулонах, то напряжение U будет выражено в вольтах; если же A_1 выражена в эргах, а Q_1 — в единицах заряда СГС_Q, то U_1 будет выражено в единицах СГС_U. Тогда $A = UQ$, $A_1 = U_1 Q_1$.

Так как 1 джоуль равен 10^7 эргов, то $1 \text{ В} \cdot 1 \text{ Кл} = 10^7 \cdot 1 \text{ ед. СГС}_U \cdot 1 \text{ ед. СГС}_Q$. Отсюда

$$1 \text{ ед. СГС}_U = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ Кл} \cdot c}{10^7 \cdot 1 \text{ Кл} \cdot 10} = c \cdot 10^{-8} \text{ В},$$

так как единица заряда 1 ед. СГС_Q = $10/c$ Кл. Таким образом, единица напряжения 1 ед. СГС_U = $c \cdot 10^{-8}$ В.

Пользуясь законом Ома, легко найти единицу сопротивления системы СГС, а пользуясь формулой $C = q/U$, — единицу емкости:

$$1 \text{ ед. СГС}_R = \frac{c \cdot 10^{-8} \text{ В}}{\frac{10}{c} \text{ А}} = c^2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом};$$

$$1 \text{ ед. СГС}_C = \frac{\frac{10}{c} \text{ Кл}}{c \cdot 10^{-8} \text{ В}} = \frac{10^9}{c^2} \Phi.$$

Несколько сложнее связь между единицами СИ и симметричной системы Гаусса в том случае, когда эти

единицы зависят от формы уравнений электромагнитного поля (например, магнитодвижущей силы, единицы напряженности магнитного поля).

Магнитодвижущая сила F в системе СГС выражается единицами системы СГСМ. Единицей магнитодвижущей силы в системе СГС является гильберт (Гб), равный $10/4\pi$ А, так как единица силы тока 1 ед. СГСМ = 10 А, а отношение значений магнитодвижущей силы в рационализованной и классической форме равно 4π , т. е.

$$F = F_1/4\pi; \quad 1 \text{ Гб} = 10/4\pi \text{ А.}$$

Связь между единицами напряженности магнитного поля легко найти из закона полного тока. Согласно этому закону м. д. с. линейного проводника равна $F = 2\pi r H = I(\text{СИ})$ и $F_1 = 2\pi r_1 H_1 = 4\pi I(\text{СГС})$, откуда

$$H = \frac{F}{2\pi r}; \quad H_1 = \frac{F_1}{2\pi r_1};$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{и} \quad H_1 = \frac{2I}{r_1}.$$

Если $r = 1$ м; $I = 1$ А = 0,1 ед. СГСМ, то $H = 1/2\pi$ А/м, $H_1 = 2 \cdot 0,1/100 = 0,002$ Э; 1 А/м = $4\pi \cdot 10^{-3}$ Э и 1 Э = $10^3/4\pi$ А/м.

* * *

В практике проектирования и строительства судов используются все физические величины, так как современное судно представляет собой комплекс разнообразных технических средств. Размеры физических величин имеют очень широкий диапазон. Числовые значения величин в справочной и нормативной литературе устанавливались в течение длительного времени и прочно вошли в практику обучения и использования в промышленности. Поэтому целесообразно указать некоторые размеры одних и тех же величин для применения их как на предприятиях судостроительной промышленности, так и в учебных заведениях, с тем чтобы в дальнейшем справочная, учебная, научная и техническая литература была бы в известной степени унифицирована.

Надо стремиться к тому, чтобы числовые значения величин в дальнейшем были бы более или менее близкими к действующим в настоящее время. Однако добиться полного совпадения этих значений не всегда возможно [3].

Например, в строительной механике судов напряжения в конструкциях принято выражать в кгс/мм². Единица паскаль в данном случае неудобна, так как $1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 10^7 \text{ Па}$. В системе кратных и дольных единиц нет единицы, соответствующей этому соотношению, поэтому следует воспользоваться единицей МПа (1 Н/мм²), равной примерно 0,1 кгс/мм², и тогда справочные данные числовых значений напряжения возрастут примерно в 10 раз.

В теплотехнической литературе давление принято измерять в кгс/см²; $1 \text{ кгс/см}^2 = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Очевидно, и в данном случае следует воспользоваться единицей МПа: $1 \text{ МПа} \approx 10 \text{ кгс/см}^2$ ($1 \text{ МПа} = 100 \text{ Н/см}^2$). Числовые значения единиц давления уменьшатся в 10 раз.

В ближайшие годы не удастся избежать применения наравне с единицами СИ некоторых внесистемных единиц, и поэтому в расчетах сохранятся такие неудобные коэффициенты, как 0,514444 (узел), $2\pi/60$ (об/мин) и т. п.

Разрешено применение таких единиц, как ватт-час и киловатт-час.

В приложении приведены наиболее удобные, по нашему мнению, единицы различных физических величин, встречающихся в судостроении. Единицы системы СГС еще будут использоваться в теоретической физике. Поэтому в книге приведены таблицы, показывающие связь единиц системы СГС и единиц СИ.

В практике магнитных расчетов на судах единицами системы СГС пользоваться не следует.

Международная система получает широкое применение в работах и документации стран СЭВ.

В Комплексной программе дальнейшего углубления и совершенствования сотрудничества и развития социалистической интеграции стран — членов СЭВ (1971 г.) отмечается: «Начать с 1971 г. работу по созданию единой системы эталонов СЭВ, учитывая Международную систему единиц измерений (СИ), системы стандартных образцов веществ и материалов, системы стандартных справочных данных и единых норм точности и методов учета количества и испытаний качества сырья, материалов и продукции». Безусловно в ближайшие годы Международная система единиц получит широкое распространение.

ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ Внесистемных Единиц, выраженные в единицах СИ

Величина	Единица величины	Сокращенное обозначение		Значение в единицах СИ
		русское	международное	
Длина	морская миля	м. миля	n. mile	1852 м
	микрометр	мкм	μm	$1 \cdot 10^{-6}$ м
Масса	ангстрем	Å	Å	$1 \cdot 10^{-10}$ м
	тонна	т	t	$1 \cdot 10^3$ кг
	центнер	ц	q	$1 \cdot 10^2$ кг
Время	карат	кар	ct	$2 \cdot 10^{-4}$ кг
	минута	мин	min	60 с
	час	ч	h	3600 с
	сутки	сут	d	86400 с
	неделя	нед	—	7 сут
	месяц	мес	—	От 28 до 31 сут
	год	—	a	12 мес
Плоский угол	век	—	—	100 лет
	полный угол	—	—	2π рад = 6,283185 рад
	прямой угол	└...°	└...°	$\pi/2$ рад = 1,570796 рад
	градус	...°	...°	$\pi/180$ рад = = $1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...'	...'	$\pi/10800$ рад = = $2,908882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	..."	..."	$\pi/648000$ рад = = $4,848137 \cdot 10^{-6}$ рад
	Телесный угол	гон	гон	$0,01^{\text{L}}$ = $1,570796 \cdot 10^{-2}$ рад
	полный телесный угол	—	—	4л ср = 12,56637 ср
	градус в квадрате	□°	□°	$3,0462 \cdot 10^{-4}$ ср

Площадь	ар	а	a	100 м ²
	гектар	га	ha	$1 \cdot 10^4$ м ²
Объем	литр	л	l	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³
Скорость	узел	уз	kn	1 м. миля/ч = = 0,514444 м/с
	метр в минуту	м/мин	m/min	0,01666667 м/с
	метр в час	м/ч	m/h	$0,277778 \cdot 10^{-3}$ м/с
	километр в час	км/ч	km/h	0,277778 м/с
Частота вращения	оборот в минуту	об/мин	—	$2\pi/60$ рад/с = 0,1666 с ⁻¹
	оборот в секунду	об/с	—	2π рад/с
Сила	тонна-сила	тс	tf	$9,80665 \cdot 10^3$ Н
	грамм-сила	гс	gf	$9,80665 \cdot 10^{-3}$ Н
Работа и энергия	ватт-час	Вт·ч	W·h	$3,6 \cdot 10^3$ Дж
	киловатт-час	кВт·ч	kW·h	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
Мощность	лошадиная сила	л. с.	—	735,499 Вт
Объемный расход	кубический метр в минуту	м ³ /мин	m ³ /min	$1,6667 \cdot 10^{-2}$ м ³ /с
	кубический метр в час	м ³ /ч	m ³ /h	$0,277778 \cdot 10^{-3}$ м/с
	литр в минуту	л/мин	l/min	$16,6667 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с
	литр в час	л/ч	l/h	$0,277778 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с
	литр в секунду	л/с	l/s	10^{-3} м ³ /с
	ампер-час	А·ч	A·h	3600 Кл
Количество электричества, электрический заряд				
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	Ом·мм ² /м	Ω·mm ² /m	10^{-6} Ом·м
	ом-сантиметр	Ом·см	Ω·ст	10^{-2} Ом·м
Количество теплоты (внутренняя энергия, энтальпия)	калория (межд.)	кал	cal	4,1868 Дж (точно)
	килокалория (межд.)	ккал	kcal	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж (точно)
	калория термохимическая	—	—	4,1840 Дж

Величина	Единица величины	Сокращенное обозначение		Значение в единицах СИ
		русское	международное	
Удельное количество теплоты	калория на грамм килокалория на килограмм	кал/г ккал/кг	cal/g kcal/kg	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/кг $4,1868 \cdot 10^3$ Дж/кг
Теплоемкость системы	калория на градус Цельсия	кал/°C	cal/°C	4,1868 Дж/К (точно)
	килокалория на градус Цельсия	ккал/°C	kcal/°C	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/К
Удельная теплоемкость	калория на грамм-градус Цельсия	кал/(г · °C)	cal/(g · °C)	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К)
	килокалория на килограмм-градус Цельсия	ккал/(кг · °C)	kcal/(kg · °C)	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К)
Тепловой поток	калория в секунду килокалория в час	кал/с ккал/ч	cal/s kcal/h	4,1868 Вт (точно) 1,1630 Вт (точно)
Поверхностная плотность теплового потока	калория в секунду на квадратный сантиметр	кал/(с · см ²)	cal/(s · cm ²)	$4,1868 \cdot 10^4$ Вт/м ² (точно)
	килокалория в час на квадратный метр	ккал/(ч · м ²)	kcal/(h · m ²)	1,1630 Вт/м ² (точно)
Коэффициент теплообмена (теплоотдача)	калория на квадратный сантиметр-секунду-градус Цельсия	кал/(с · см ² · °C)	cal/(s · cm ² · °C)	$4,1868 \cdot 10^4$ Вт/(м ² · К)
	килокалория на квадратный метр-час-градус Цельсия	ккал/(ч · м ² · °C)	kcal/(h · m ² · °C)	1,1630 Вт/(м ² · К) (точно)

Теплопроводность	калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия	кал/(с · см · °C)	cal/(s · cm · °C)	$4,1868 \cdot 10^2$ Вт/(м · К)
	килокалория в час на метр-градус Цельсия	ккал/(ч · м · °C)	kcal/(h · m · °C)	1,1630 Вт/(м · К)
Температуропроводность	сантиметр в квадрате на секунду	см ² /с	cm ² /s	10^{-4} м ² /с
Давление	метр в квадрате на час бар	м ² /ч бар	м ² /h bar	$2,7778 \cdot 10^{-4}$ м ² /с 10^5 Па
	миллиметр водяного столба миллиметр ртутного столба	мм вод. ст. мм рт. ст.	mm H ₂ O mm Hg	9,80665 Па 133,322 Па
Доза излучения Эквивалентная доза излучения	техническая атмосфера рад бэр	ат, или кгс/см ² рад бэр	kgf/cm ² rad rem	$9,80665 \cdot 10^4$ Па 10^{-2} Дж/кг 10^{-2} Дж/кг
	Мощность дозы излучения Мощность эквивалентной дозы	рад в секунду рад в час бэр в секунду	рад/с рад/ч бэр/с	rad/s rad/h rem/s
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучения	рентген	R	R	$2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения	рентген в секунду	R/с	R/s	$2,58 \cdot 10^4$ А/кг
	рентген в минуту	R/мин	R/min	$4,30 \cdot 10^{-6}$ А/кг
	рентген в час	R/ч	R/h	$7,17 \cdot 10^{-8}$ А/кг
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность изотопа)	кюри	Ки	Ci	$3,700 \cdot 10^{10}$ с ⁻¹

**СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ, ПРИМЕНЯЕМЫМИ
В ЗАРУБЕЖНОЙ ТЕХНИКЕ, И ЕДИНИЦАМИ СИ**

Единицы длины (в метрах)

- 1 морская миля (n. mile) = 1852 м (точно)
- 1 английская миля (mile) = 1609,344 м (точно)
- 1 ярд (yd) = 0,9144 м (точно)
- 1 фут (ft) = 0,3048 м (точно)
- 1 дюйм (in) = $25,4 \cdot 10^{-3}$ м (точно)
- 1 кабельтов = 185,2 м (точно)
- 1 метр в других единицах длины:
- 1 м = 1,094 ярда = 3,28 фута = 39,4 дюйма

Единицы площади (в квадратных метрах)

- 1 кв. морская миля (sq. n. mile) = $3,439 \cdot 10^6$ м²
- 1 кв. английская миля (sq. mile) = $2,59 \cdot 10^6$ м²
- 1 кв. ярд (sq. yd) = 0,836 м²
- 1 кв. фут (sq. ft) = $92,9 \cdot 10^{-3}$ м²
- 1 кв. дюйм (sq. in) = $0,645 \cdot 10^{-3}$ м² (точно)

Единицы объема (в кубических метрах)

- 1 куб. ярд (cu. yd) = 0,765 м³
- 1 куб. фут (cu. ft) = $28,3 \cdot 10^{-3}$ м³
- 1 куб. дюйм (cu. in) = $16,39 \cdot 10^{-6}$ м³
- 1 американский галлон (gal) = $3,785 \cdot 10^{-3}$ м³
- 1 нефтяной баррель (oil barrel) = 0,159 м³
- 1 галлон (английский) (gal U. K.) = $4,54609 \cdot 10^{-3}$ м³

Единицы массы (в килограммах)

- 1 английская тонна (long ton) = 1016,05 кг
- 1 английская судовая тонна (short ton) = 907,185 кг
- 1 английский центнер (cwt) = 50,8023 кг
- 1 английский фунт (lb) = 0,45359 кг
- 1 унция (oz) = $28,3495 \cdot 10^{-3}$ кг
- 1 техническая единица массы (1 ТЕМ) = 1 кгс · с²/м = 9,80665 кг (точно)

Единицы скорости (в метрах в секунду)

- 1 узел (knot, kn) = 0,514444 м/с
- 1 ярд в секунду (yd/s) = 0,914 м/с
- 1 фут в секунду (ft/s) = 0,3048 м/с (точно)
- 1 дюйм в секунду (in/s) = $25,4 \cdot 10^{-3}$ м/с

Единицы силы (в ньютонах)

- 1 паундаль (pdl) = 0,138255 Н
- 1 фунт-сила (lbf) = 4,44822 Н

Единицы плотности (в килограммах на кубический метр)

- 1 фунт на кубический фут (lb/ft³) = 16,0185 кг/м³

Единицы удельного веса (в ньютонах на кубический метр)

- 1 фунт-сила на кубический фут (lbf/ft³) = 157,087 Н/м³

Единицы давления (в паскалях)

- 1 паундаль на квадратный фут (pdl/ft²) = 1,48816 Па
- 1 фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in²) = 6894,76 Па
- 1 фут водяного столба (ft H₂O) = 2989,07 Па
- 1 дюйм водяного столба (in H₂O) = 249,089 Па
- 1 дюйм ртутного столба (in Hg) = 3386,39 Па

Единицы работы и энергии (в джоулях)

- 1 фут-фунт-сила (ft · lbf) = 1,35582 Дж
- 1 британская тепловая единица (Btu) = 1055,06 Дж

Единицы мощности (в ваттах)

- 1 лошадиная сила (л. с.) = 735,499 Вт
- 1 лошадиная сила (английская) (h. p.) = 745,700 Вт
- 1 британская тепловая единица в час (Btu/h) = 0,293071 Вт

Единицы удельной теплоемкости (в джоулях на килограмм-кельвин)

- 1 британская тепловая единица на фунт-градус Фаренгейта (Btu/lb · °F) = $4186,8 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К) (точно)
- Связь температуры в градусах Фаренгейта t_F с температурой в градусах Цельсия t , Ренкина T_R и в кельвинах:

$$t = T - 273,15 = \frac{5}{9}(t_F - 32) = \frac{5}{9}T_R - 273,15;$$

$$T = t + 273,15 = \frac{5}{9}t_F + 255,37 = \frac{5}{9}T_R.$$

- 1 градус Ренкина = 5/9 К (терм.)
- 1 градус Фаренгейта = 5/9 °С (межд.)
- 1 К = 1°С

ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

Наименование	Обозначение	Числовое значение	
		в единицах СИ	в единицах системы СГС (симметричной)
Скорость света	c	$2,9979250 \cdot 10^8$ м/с	$2,9979250 \cdot 10^{10}$ см/с
Заряд электрона	e	$1,6021913 \cdot 10^{-19}$ Кл	$4,803249 \cdot 10^{-10}$ ед. СГС
Число Авогадро	N	$6,022035 \cdot 10^{26}$ кмоль $^{-1}$	$6,022035 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$
Масса покоя протона	m_p	$1,6726513 \cdot 10^{-27}$ кг	$1,6726513 \cdot 10^{-24}$ г
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,6749575 \cdot 10^{-27}$ кг	$1,6749575 \cdot 10^{-24}$ г
Масса покоя электрона	m_e	$9,109548 \cdot 10^{-31}$ кг	$9,109548 \cdot 10^{-28}$ г
Постоянная Больцмана	k	$1,380622 \cdot 10^{-23}$ Дж/К	$1,380622 \cdot 10^{-16}$ эрг/°С
Гравитационная постоянная	G	$6,6732 \cdot 10^{-11}$ Н · м 2 /кг 2	$6,6732 \cdot 10^{-8}$ дин · см 2 /г 2
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31434 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль · К)	$8,31434 \cdot 10^7$ эрг/моль °С
Постоянная Фарадея	F	$9,648452 \cdot 10^7$ Кл/кмоль	$2,89261 \cdot 10^{14}$ ед. СГС/моль
Постоянная Планка	h	$6,626189 \cdot 10^{-34}$ Дж · с	$6,626189 \cdot 10^{-27}$ эрг · с
Магнитный момент протона	μ_p	$1,4106203 \cdot 10^{-26}$ А · м 2	$1,4106203 \cdot 10^{-23}$ эрг · Гс
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	$1,7588044 \cdot 10^{11}$ Кл/кг	$5,272289 \cdot 10^{17}$ ед. СГС/г
Гиромагнитное отношение свободных протонов	γ_p	$2,6751965 \cdot 10^8$ рад · с/Т	$2,6751965 \cdot 10^4$ рад · с/Гс

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ И ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ

Величина	Единица величины, применяемая в настоящее время	Рекомендуемая автором единица	Отношение рекомендуемой к применяемой единице
Длина			
Путь морского судна	морская миля	морская миля	1
Расстояние	кабельтов	метр	1/185,2
Путь речного судна	километр	километр	1
Длина, ширина, осадка судов, длина линий (воздушных, гидравлических, кабельных), установочные и габаритные размеры оборудования, длина радиоволн, размеры деталей, диаметры валов и трубопроводов, размеры приборов	метр	метр	1
Допуски в размерах	сантиметр	сантиметр	1
Длина световых волн	миллиметр	миллиметр	1
	микрометр	микрометр	1
	ангстрем	нанометр	10
Площадь			
Поверхности палубы, бортов надстроек, помещений внутри судов и т. п.	квадратный метр	квадратный метр	1
Поверхности нагрева и охлаждения, поверхности теплообмена	» »	» »	1
Сечение трубопроводов, кабелей, элементов конструкций, изделий	квадратный миллиметр	квадратный миллиметр	1
	квадратный сантиметр	квадратный сантиметр	1

Величина	Единица величины, применяемая в настоящее время	Рекомендуемая автором единица	Отношение рекомендуемой к применяемой единице
Объем			
Объем судовых помещений (отсеков, цистерн); объем грузов; объем цилиндров двигателей, объем баллонов, элементов конструкций	кубический метр	кубический метр	1
	кубический сантиметр	кубический сантиметр	1
	кубический миллиметр	кубический миллиметр	1
Угол (плоский)			
Угол крена, дифферента; курсовой угол; угол поворота механизмов и устройств. Угол склонения и наклонения	градус	градус	1
	минута секунда	минута секунда	
Скорость (линейная)			
Скорость хода морских судов Скорость хода речных судов Скорость хода моделей судов; скорость движения пара, жидкостей и газов	узел	узел	1
	километр в час	километр в час	1
	метр в секунду	метр в секунду	1
	сантиметр в секунду	сантиметр в секунду	1
Ускорение			
Ускорение моделей и судов при выходе на курс и остановке Ускорение при ударе и вибрации	метр на секунду в квадрате	метр на секунду в квадрате	1
	ускорение свободного падения (9,80655 м/с ²) Гал (сантиметр на секунду в квадрате)	то же » »	1/9,80655 10 ²

Масса			
«Вес» грузов; запасы топлива, воды; боезапас; «вес» снаряжения «Вес» транспортируемых и перегружаемых грузов. Водоизмещение	единицы веса: килограмм-сила	единицы массы: килограмм	1
	тонна-сила	тонна	1
Плотность			
Плотность морской воды, топлива, металлов, пластических масс, дерева, строительных материалов	удельный вес: килограмм-сила на кубический метр	плотность: килограмм на кубический метр	1
	килограмм-сила на кубический дециметр		то же 10 ⁻³
Расход (объемный)			
Расход воздуха, воды, газа, пара Производительность компрессоров, насосов	кубический метр в секунду	кубический метр в секунду	1
	кубический метр в минуту	кубический метр в минуту	1
	кубический метр в час	кубический метр в час	1
Расход топлива и смазочных веществ	литр в минуту	литр в минуту	1
	литр в час	литр в час	1
Расход (массовый)			
Расход топлива, смазочных веществ; производительность насосов, компрессоров, парогенераторов	килограмм в секунду	килограмм в секунду	1

Величина	Единица величины, применяемая в настоящее время	Рекомендуемая единица	Отношение рекомендуемой к применяемой единице
Производительность транспортных и грузоподъемных устройств и сооружений	килограмм в час тонна в час	килограмм в час тонна в час	1 1
Сила Подъемная сила транспортных средств; сопротивление движению; натяжение буксира; дедевит; упор винтов	килограмм-сила тонна-сила	ньютон килоньютон	1/9,81 1/9,81
Момент силы Вращающий момент на валах, скручивающий момент, момент на баллере руля, кренящий момент, изгибающий момент Момент на осях приборов	тонна-сила-метр килограмм-сила-метр дина-сантиметр	килоньютон-метр ньютон-метр микроньютон-метр	1/9,81 1/9,81 10
Давление (напряжение) Модули: упругости, Юнга, сдвига; напряжение в конструкциях и их элементах; пределы текучести, упругости, прочности Давление пара в парогенераторах и паровых турбинах, давление газа в двигателях дизеля и газовых турбинах	килограмм-сила на квадратный миллиметр техническая атмосфера килограмм-сила на квадратный сантиметр бар	мегапаскаль деканьютон на квадратный сантиметр То же » » » »	1/9,81 ($\sim 10^{-1}$) 0,981 (~ 1) 1/0,0981 ~ 10 10

Давление воды на обшивку корпуса	тонна-сила на квадратный метр	килопаскаль	1/9,81 $\sim 10^{-1}$
Атмосферное давление	миллиметр ртутного столба	килопаскаль	7,50 (1000/133,322)
Перепад давления воздуха	миллиметр водяного столба	»	1/9,81
Звуковое давление	дина на квадратный сантиметр	паскаль	10
Вязкость			
Динамическая вязкость	пуаз килограмм-сила-секунда на квадратный метр	паскаль-секунда » »	10 1/9,81
Кинематическая вязкость (Исследования в гидромеханике)	квадратный метр на секунду стокс	квадратный метр на секунду то же	1 10 ⁴
Ударная вязкость (равна отношению работы, затрачиваемой для ударного излома образца, к его площади поперечного сечения в месте надреза)	килограмм-сила-метр на сантиметр в квадрате килограмм-сила-сантиметр на сантиметр в квадрате	килоджоуль на метр в квадрате килоньютон на метр то же	1/98,1 1/9,81 1/981
Работа, энергия, количество теплоты			
Работа паровых и газовых турбин, двигателей дизеля	лошадиная сила-час	киловатт-час, мегаджоуль	1/0,735 1/2,648
Работа электрических двигателей	джоуль, килоджоуль	джоуль, килоджоуль	1 1
Энергия электрических установок	киловатт-час	киловатт-час	1

Величина	Единица величины, применяемая в настоящее время	Рекомендуемая единица	Отношение рекомендуемой к применяемой единице
Количество теплоты, расход энергии в нагревательных устройствах	калория киловатт-час	джоуль килоджоуль киловатт-час	1/4,1868 1/3600 1
Энергия в электронных приборах, радиотехнических устройствах, энергия радиоактивных излучений	килоджоуль электронвольт мегаэлектронвольт	килоджоуль электронвольт мегаэлектронвольт джоуль	1 1 1 1 1/1,60219 · 10 ⁻¹³
Мощность			
Мощность двигателей, приводов рабочих механизмов	лошадиная сила	киловатт	1/0,735499
Тепловой поток	калория в секунду килокалория в час	ватт »	1/4,1868 1/1,1630
Мощность электрических цепей	ватт киловатт	ватт киловатт	1 1
Удельный расход топлива на единицу работы			
Удельный расход топлива в энергетических установках судов	грамм на лошадиную силу-час	грамм на киловатт-час микрограмм на джоуль	1,36 2,6478
Коэффициент теплообмена (теплопередачи)			
Коэффициент теплообмена (теплопередачи) в энергетических, нагревательных и холодильных установках; коэффициент теплопередачи судовых помещений	килокалория на квадратный метр-час-градус	ватт на квадратный метр-кельвин	1/1,1630

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов Е. М. Применение систем единиц физических величин. Изд-во ЛКИ, 1963.
2. Аристов Е. М. Физические величины и единицы их измерения. Л., Судпромгиз, 1963.
3. Аристов Е. М. О применении в судостроительной промышленности Международной системы единиц. — «Судостроение», 1964, № 3, стр. 72—77.
4. Батарчукова Н. Р. Новое определение метра. М., Изд-во стандартов, 1964.
5. Беклемишев Л. В. Меры и единицы физических величин. М., Гостехиздат, 1954.
6. Богуславский М. Г. и др. Таблицы перевода единиц измерения. М., Стандартгиз, 1963.
7. Богуславский М. Г., Широков К. П. Международная система единиц. М., Изд-во стандартов, 1968.
8. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин. М., Изд-во стандартов, 1967.
9. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М., Изд-во стандартов, 1971.
10. Бурдун Г. Д., Калашников Н. В., Стоцкий Л. Р. Международная система единиц. М., «Высшая школа», 1964.
11. Давыдов В. В. Применение новой Международной системы единиц в технике. М., «Транспорт», 1964.
12. Калантаров П. Л. Единицы измерения электрических и магнитных величин. М., Госэнергоиздат, 1948.
13. Калашников Н. В. и др. Единицы измерений и обозначений физико-технических величин. М., «Недра», 1966.
14. Карякин И. И., Быстров К. Н., Киреев П. С. Краткий справочник по физике. М., «Высшая школа», 1962.
15. Лисенков А. А. Международная система СИ. М., «Наука», 1966.
16. Маликов С. Ф. Основы метрологии. М., Стандартгиз, 1949.
17. Маликов С. Ф., Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., Изд-во стандартов, 1966.
18. Метрологическая служба в СССР. М., Изд-во стандартов. Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968.
19. Мясников Л. Л. Акустические измерения. М., ОНТИ НКТП СССР, 1937.
20. Навидкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968.
21. Научно-техническая терминология. Т. 2 и 5. ВНИИКИ. Изд-во стандартов, 1970.

22. О внедрении Международной системы единиц. Под ред. К. П. Широкова. М., Изд-во стандартов, 1965.
23. Сборники рекомендуемых терминов АН СССР. Вып. 59 (Электротехника, электротехника, электроника). М., 1962.
24. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М., «Наука», 1969.
25. Тюрин Н. И. В поисках точности. М., Физматгиз, 1960.
26. Физический энциклопедический словарь. Т. 1—5. М., «Советская энциклопедия», 1960—1966.
27. Чертов А. Г. Международная система единиц измерений. Издание второе. М., «Высшая школа», 1967.
28. Широков К. П. Общие вопросы метрологии. М., «Машиностроение», 1967.
29. ГОСТ 8849—58. Акустические единицы.
30. ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.
31. ГОСТ 13600—68. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений. Классы точности. Общие требования.
32. ГОСТ 8848—63. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений.
33. ГОСТ 15855—70. Измерения времени и частоты. Термины и определения.
34. ГОСТ 9867—61. Международная система единиц.
35. ГОСТ 7664—61. Механические единицы.
36. ГОСТ 15831—70. Морской транспорт. Эксплуатация транспортного флота и портов. Термины и определения.
37. ГОСТ 1493—62. Обозначения основных общетехнических величин.
38. ГОСТ 7663—55. Образование кратных и дольных единиц измерений.
39. ГОСТ 7932—56. Световые единицы.
40. ГОСТ 8550—61. Тепловые единицы.
41. ГОСТ 8033—56. Электрические и магнитные единицы.
42. ГОСТ 1494—62. Электротехника. Обозначения основных величин (буквенные).
43. ГОСТ. Единицы физических величин (проект). Редакции 1970 г. и 1972 г.