

М.П. Малков

Справочник
по физико-техническим основам криогеники

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 621.3
ББК 31.352
М11

М11 **М.П. Малков**
Справочник: по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков – М.: Книга по Требованию, 2023. – 437 с.
ISBN 978-5-458-35904-7

ISBN 978-5-458-35904-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

13.2. Одноколонный и двухколонный разделительные аппараты	324	15.10. Газификаторы	363
13.3. Промышленные воздухо-разделительные установки	327	Раздел шестнадцатый. Криосистемы для физических исследований	365
13.4. Получение инертных газов из воздуха	334	16.1. Криостаты для физических исследований	365
13.5. Вопросы безопасности воздухо-разделительных установок	336	16.2. Низкотемпературные пугзырьковые камеры	374
Раздел четырнадцатый. Разделение углеводородных газовых смесей и изотопов	338	16.3. Водородные мишени	379
14.1. Извлечение гелия из природных газов	338	16.4. «Петли» для исследований в ядерных реакторах при криотемпературах	381
14.2. Разделение коксового и водяного газов	340	16.5. Криометоды получения глубокого вакуума	383
14.3. Разделение газов крекинга и пиролиза нефтяных продуктов	342	Раздел семнадцатый. Сверхпроводящие устройства	387
14.4. Низкотемпературное разделение стабильных газообразных изотопов	344	17.1. Сверхпроводящие материалы	387
Раздел пятнадцатый. Хранение и транспорт сжатых газов и сжиженных криопродуктов	346	17.2. Сверхпроводящие магнитные системы	390
15.1. Технические требования на газы и криопродукты	346	17.3. Сверхпроводящие электрические машины	400
15.2. Баллоны	349	17.4. Сверхпроводящие линии электропередачи	401
15.3. Газгольдеры	349	17.5. Транспорт на магнитной подушке	402
15.4. Резервуары для хранения и перевозки жидких азота и кислорода	351	17.6. Сверхпроводящие устройства для научных исследований	403
15.5. Сосуды и цистерны для хранения и перевозки жидких водорода и гелия	354	Список литературы	406
15.6. Хранение жидких водорода и гелия на борту космических кораблей	358	Предметный указатель	426
15.7. Хранение и перевозка сжиженных природного газа (СПГ) и фтора	359	Вклады:	
15.8. Трубопроводы для жидких криопродуктов	360	I. Диаграмма T, s для гелия (3—25 K)	
15.9. Насосы для жидких криопродуктов	362	II. Диаграмма T, s для гелия (15—300 K) [547]	
		III. Диаграмма T, s для водорода (15—150 K)	
		IV. Диаграмма T, s для водорода (140—300 K) [261]	
		V. Диаграмма T, s для азота (60—400 K) [255]	
		VI. Диаграмма T, s для воздуха (80—450 K) [255]	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы справочника ставили своей целью сосредоточить в одном месте основные физико-технические константы, термодинамические и теплотехнические соотношения, необходимые при работе в области криотемператур. В справочнике содержатся краткие описания различных криогенных устройств и анализ основных процессов, осуществляемых в них. Издание рассчитано на научных работников, инженеров и студентов старших курсов высших учебных заведений соответствующих специальностей.

После 13-го Конгресса Международного Института Холода (1971 г.) и в соответствии с ГОСТ 21957-76 принято температуры, лежащие ниже 120 К, называть криотемпературами, устройства для их получения и поддержания—криогенными, а область науки, охватывающую исследования, развитие и применение криогенной техники,—криогеникой.

За годы, прошедшие после выхода второго издания справочника (1973 г.), область использования криотемператур продолжала расширяться. Появились новые данные по физическим свойствам веществ в области криотемператур, новые устройства для получения и поддержания температур от 70 до 4 К и ниже как большой холодильной мощности, так и малой. Продолжала развиваться микрокриогенная техника. Практическое использование получили сверхпроводящие устройства. В связи с этим в третьем издании авторы уделили внимание новым разделам, в частности включили главу по техническому применению сверхпроводимости.

Все данные справочника приведены в единицах СИ.

Во избежание увеличения объема книги так же, как во втором издании, несколько сокращены главы, относящиеся к традиционным областям низких температур: получению жидкого азота, кислорода, метана, разделению воздуха и природного газа; при этом учитывалось, что по этим вопросам имеется достаточное количество отечественной литературы, на которую даны ссылки.

При подготовке к третьему изданию были использованы отечественные и зарубежные работы, появившиеся в печати вплоть до 1982 г. При пересмотре текста справочника авторы использовали свой многолетний опыт работы в области криогеники. В связи с чрезвычайно возросшим числом публикаций по криогенике в списке литературы приведены только цитируемые источники.

В третьем издании справочника написание материала распределяется следующим образом: М. П. Малков — разд. 1—5, 9, 12—14; А. Г. Зельдович — разд. 4, 7, 16, 17; И. Б. Данилов — разд. 4, 8, 10, 12, 16; А. Б. Фрадков — разд. 4, 6, 11, 15, 16.

Замечания и предложения по улучшению содержания или структуры справочника будут с благодарностью приняты редакцией и коллективом авторов. Направлять их следует по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

Раздел первый

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
И ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

В настоящее время в большинстве стран применяется международная система единиц, обозначаемая символом SI (в русском написании СИ); ее основные единицы: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела. Международная система единиц с 1 января 1980 г. применяется в СССР (ГОСТ 8.417-81) и в странах СЭВ (СТ СЭВ 1052-78) как обязательная [1—3].

Определение основных единиц:

Метр (м) — единица длины, равная 1 650 763, 73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Килограмм (кг) — единица массы; представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда (с) равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния цезия-133.

Ампер (А) — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин (К) равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль (моль) — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть ато-

мами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

Кандела (кд) равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600\,000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Кроме температуры (Т) Кельвина допускается применение температуры (t) Цельсия, определяемой выражением $t = T - 273,15$ * По размеру градус Цельсия

Таблица 1.1 Образование кратных и дольных единиц

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

* Шкала в градусах Цельсия имеет начало отсчета в точке таяния льда, т. е. в точке примерно на 0,01 К ниже тройной точки воды.

равен кельвину. Если необходимо отличать обозначение Международной практической температуры в шкале 1968 г. от термодинамической, добавляют индекс 68 (например, T_{68} или t_{68}).

Производные единицы СИ образуются из основных с помощью определяющих эти единицы уравнений. Допускается также применение наравне с единицами СИ таких единиц, как тонна, минута, час, сутки; для измерения углов — градус, минута, секунда; объема — литр. Допускаемые единицы в специальных областях см. в [1—3].

Наряду с единицами СИ временно (срок изъятия будет установлен международными решениями) разрешается применение единиц: морская миля, узел, карат, оборот в секунду, оборот в минуту, бар, текс и иепер.

Десятичные кратные и дольные единицы СИ образуют с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 1.1.

До введения единиц СИ в науке и технике широко использовались единицы систем МКС (м, кг, с), МКСК (м, кг, с, К), МКГСС (м, кг, с), СГС (см, г, с) и внесистемные. В табл. 1.2—1.8 приведены основные и производные единицы СИ и их соотношения с ранее применявшимися единицами. В табл. 1.12 [3] дан перевод единиц, применяемых в Великобритании и США, в единицы СИ, а в табл. 1.13 — взаимный перевод градусов Цельсия и Фаренгейта.

Ниже приведены значения важнейших физических констант [4] в единицах СИ и по физической углеродной шкале атомных масс ($^{12}\text{C}=12$):

Скорость света в вакууме c	$2,997925 \cdot 10^8$ м/с
Число Авогадро N_A	$6,022045 \cdot 10^{23}$ кмоль $^{-1}$
Число Лошмидта N_A/v_0	$2,68719 \cdot 10^{25}$ м $^{-3}$
Число молекул в 1 см 3 n	$7,2438 \cdot 10^{18}$ р/Т*

Атомная единица массы (а. е. м.)	$1,660565 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона m_e	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Атомная масса электрона M_e	$5,48593 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.
Масса покоя протона m_p	$1,672648 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомная масса протона M_p	$1,00727661$ а. е. м.
Масса покоя нейтрона m_n	$1,67495 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомная масса нейтрона M_n	$1,0086652$ а. е. м.
Постоянная Планка h	$1,054588 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Универсальная газовая постоянная R_0	$8,31441 \cdot 10^3$ Дж× ×моль $^{-1}$ ·К $^{-1}$
Постоянная Больцмана $k=R_0/N_A$	$1,380622 \cdot 10^{-23}$ Дж× ×К $^{-1}$
Постоянная Стефана—Больцмана σ	$5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт× ×м $^{-2}$ ·К $^{-4}$
Стандартный объем идеального газа (v_0) при 0°C и 101 325 Н/м 2	$22,4136$ м 3 ·кмоль $^{-1}$
Энергия, соответствующая массе:	
1 г.	$5,609538 \cdot 10^{26}$ МэВ
электрона	511 004 эВ
протона	938,2592 МэВ
нейтрона	939,5527 МэВ
Атомная единица массы эквивалента	931,2812 МэВ

Атомная масса по химической кислородной шкале ($O=16$ для природного кислорода)

Масса по физической углеродной шкале ($^{12}\text{C}=12$) $= 1,000043$

Атомная масса по физической кислородной шкале ($^{16}\text{O}=16$) $= 1,000317917$

Атомная масса по физической углеродной шкале ($^{12}\text{C}=12$)

*Давление—в ГПа; температура—в К.

Таблица 1.2. Единицы физических величин

Наименование величины и определяющее уравнение	Система единиц	Наименование	Сокращенное обозначение		Соотношение между единицами
			русское	международ- ное	
Длина l	СИ и МКГСС СГС Внесистем- ная	Метр	м	m	1 м=1000 мм=100 см=10 дм
		Сантиметр	см	cm	1 км=1000 м
		Микрон	мк м	μ	1 мкм=10 ⁻⁴ см=10 ⁻⁶ м
		Ангстрем	А	Å	1 Å=10 ⁻⁷ мм=10 ⁻⁶ см= =10 ⁻¹⁰ м=0,1 нм
Масса m	СИ СГС МКГСС Внесис- темная	Килограмм	кг	kg	1 кг=1000 г; 1 ц=100 кг;
		Грамм	г	g	1 т=1000 кг
		Килограмм-сила-се- кунда в квадрате на метр	кгс·с ² /м	kgf·s ² /m	1 кгс·с ² /м=9,80665 кг
		Тонна Центнер Карат	т ц	t q	1 карат=2·10 ⁻⁴ кг
Время t	СИ, СГС и МКГСС Внесистем- ная	Секунда		s	1 ч=3600 с=60 мин
		Час		h	1 мин=60 с
Термодинами- ческая темпера- тура T	То же	Минута	мин	min	
		Кельвин	К	K	См. табл. 1.8
Температура t	СИ	Градус Цельсия	°C	°C	См. табл. 1.8
Частота коле- баний $\nu=1/t$	СИ, СГС и МКГСС	Герц	Гц	Hz	Герц-частота, при которой за одну секунду соверша- ется одно полное коле- бание
Скорость ли- нейная $v=l/t$	СИ и МКГСС СГС Внесис- темная То же	Метр в секунду	м/с	m/s	1 см/с=0,01 м/с
		Сантиметр в секунду	см/с	cm/s	1 км/ч=0,2778 м/с
		Километр в час	км/ч	km/h	1 м/мин=0,01667 м/с
Ускорение линейное $a=\Delta v/\Delta t$	СИ и МКГСС СГС	Метр в минуту	м/мин	m/min	
		Метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²	—
		Сантиметр на секунду в квадрате	см/с ²	cm/s ²	
Скорость угло- вая $\omega=\Delta\alpha/\Delta t$	СИ и СГС Внесис- темная То же	Радан в секунду	рад/с	rad/s	1 об/мин= $\frac{\pi}{30}$ рад/с
		Оборот в секунду	об/с		1 об/с=2π рад/с
		Оборот в минуту	об/мин		
Площадь $S=l^2$	СИ и МКГСС СГС Внесистем- ная	—	м ²	m ²	1 га=10 ⁴ м ² =100 а
		—	см ²	cm ²	1 а=100 м ²
		Гектар	га	ha	1 м ² =10 ⁴ см ² =10 ⁶ мм ²
		Ар	а	a	1 км ² =100 га=10 ⁶ м ²
Объем $v=l^3$	СИ и МКГСС СГС Внесистем- ная	—	м ³	m ³	1 м ³ =10 ³ л=10 ⁶ см ³
		—	см ³	cm ³	1 л=10 ⁻³ м ³ =10 ³ см ³ =1 дм ³
		Литр	л	l	
Сила $F=ma$ ($P=mg$)	СИ СГС МКГСС Внесистем- ная	Ньютон	Н	N	1 Н=10 ⁵ дин=0,1019713 кгс
		Дина	дин	dyn	1 дин=10 ⁻⁵ Н=1,019716× ×10 ⁻⁶ кгс
		Килограмм-сила	кгс	kgf	1 кгс=1000 грамм=сила= =9,80665 Н=9,80665 10 ⁵ дин
		Тонна-сила		tf	1 тс=1000 кгс=9806,65 Н
Плотность $\rho=m/v$	СИ СГС МКГСС	—	кг/м ³	kg/m ³	1 кг/м ³ =10 ⁻³ г/см ³ = =10 ⁻³ т/м ³ =10 ⁻³ кг/дм ³
		—	г/см ³	g/cm ³	
		—	кгс·с ² /м ⁴	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$	1 г/см ³ =1000 кг/м ³ =1 кг/дм ³

Продолжение табл. 1.2

Наименование величины и определяющее уравнение	Система единиц	Наименование	Сокращенное обозначение		Соотношение между единицами
			русское	международ- ное	
Давление $p=F/S$	СИ	Паскаль (ньютон на метр в квадрате)	Па(Н/м ²)	Pa(N/m ²)	См. табл. 1.3
	СГС	Дина на квадратный сантиметр	дин/см ²	dyn/cm ²	
	МКГСС	Килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	kgf/m ²	
	Внеси- стемная	бар			
	То же	мм рт.ст. (тор)			
Абсолютная динамическая вязкость $\eta = \frac{F}{S \cdot \text{grad} v}$	" "	мм вод. ст			1 Па·с = 1 кг/(м·с) = 10 П = = 0,101972 кгс·с/м ² 1 П = дин·с/см ² = 1 г/(см·с) = = 0,1 Па·с = 0,0101972 кгс·с/м ² 1 кгс·с/м ² = 9,80665 Па·с = = 98,0665 П (1 сП довольно точно соответствует вяз- кости воды при 20,5 °С)
	" "	атм			
	СИ	Паскаль-секунда	Па·с	Pa·s	
	СГС	Пуаз	П	Р	
	МКГСС	Сантипуаз	сП	сР	
Кинематичес- кая вязкость $\nu = \eta/\rho$	СИ	Килограмм-сила-се- кунда на квадратный метр	кгс·с/м ²	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$	1 м ² /с = 10 ⁴ см ² /с = 3600 м ² /ч 1 Ст = см ² /с = 10 ⁻⁴ м ² /с = = 100 сСт = 0,36 м ² /ч
	СГС	Метр в квадрате на секунду	м ² /с	м ² /s	
	Стокс	Сантистокс	Ст	st	
	Джоуль (Н·м)	Дж	Дж	J	
	Эрг	эрг	эрг	erg	
Энергия, рабо- та, теплота $A = F \cdot l$	МКГСС	Килограмм-сила-метр	кгс·м	kgf·m	См. табл. 1.4
	Внеси- стемная	Киловатт-час	кВт·ч	kW·h	
		Калория	кал	cal	
		Лошадиная сила-час	л. с·ч	—	
		Электрон-вольт	эВ	eV	
Мощность $N = A/t$	СИ	Ватт	Вт(Дж/с)	W	См. табл. 1.5
	ГС	Эрг в секунду	эрг/с	erg/s	
	МКГСС	Килограмм-сила-метр в секунду	кгс·м/с	kgf·m/s	
	Внеси- стемная	Лошадиная сила	—	—	
Удельная теп- лоемкость, удельная энтропия	СИ	Джоуль на кило- грамм-кельвин	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	1 Дж/(кг·К) = 10 ⁻³ Дж/(г·°C) × К) = 10 ⁻³ эрг/(г·К) = = 0,2389 · 10 ⁻³ ккал/(кг·°C) 1 ккал/(кг·°C) = = 1 кал/(г·°C) = = 4,1868 Дж/(кг·К) = = 4,1858 Дж/(г·°C) = = 4,1858 · 10 ³ эрг/(г·°C) 1 эрг/(г·К) = 10 ⁻⁴ Дж/(кг·К) = = 10 ⁻⁷ Дж/(г·°C) = 0,2389 × × 10 ⁻⁷ ккал/(кг·°C) = 0,2389 × × 10 ⁻⁷ кал/(г·°C)
	СГС	Эрг на грамм-кель- вин	эрг/(г·К)	erg/(g·K)	
	Внеси- стемная	Калория на грамм- градус Цельсия	кал/(г·°C)	cal/(g·°C)	
	—	Килокалория на килограмм-градус Цельсия	ккал/(кг·°C)	kcal/(kg·°C)	
Теплопровод- ность λ	СИ	Ватт на метр-кель- вин	Вт/(м·К)	W/(m·K)	См. табл. 1.6
	Внеси- стемная	Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия	кал/(см·с·°C)	cal/(cm·s·°C)	
	То же	Килокалория в час на метр-градус Цельсия	ккал/(ч·м·°C)	kcal/(m·h·°C)	
Коэффициент теплопередачи k	СИ	Ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м ² ·К)	W/(m ² ·K)	См. табл. 1.7
	Внеси- стемная	Калория на санти- метр в квадрате- секунду-кельвин	кал/(см ² ·с·К)	cal/(cm ² ·s·K)	
	То же	Килокалория на метр в квадрате-час-кель- вин	ккал/(м ² ·ч·К)	kcal/(m ² ·h·K)	
Поверхност- ное натяжение σ	СИ	Ньютон на метр	Н/м	N/m	1 дин/см = 10 ⁻³ Н/м = 1,0197 × × 10 ⁻⁴ кгс/м = 1 эрг/см 1 Н/м = 10 ³ дин/см = 1,0197 × × 10 ⁻¹ кгс/м = 10 эрг/см 1 кгс/м = 9,806 Н/м = 9,806 × × 10 ³ дин/см = 9,803 × × 10 ³ эрг/см
	СГС	Дина на сантиметр	дин/см	dyn/cm	
	МКГСС	Килограмм-сила на метр	кгс/м	kgf/m	

Таблица 1.3. Соотношение между единицами давления

Единица	Па	мм рт. ст. (тор)	мм вод.	бар	атм (техническая), кгс/см ²	атм (физическая)	кгс/м ²	дин/см ²
Паскаль (Н/м ²)	1	7,5·24·10 ⁻³	1,01972·10 ⁻¹	10 ⁻⁶	1,01972·10 ⁻⁶	0,986923·10 ⁻⁶	1,01972·10 ⁻¹	10
Миллиметр ртутного столба (тор)	133,322	1	13,595	1,33322·10 ⁻³	1,35951·10 ⁻³	1,31579·10 ⁻³	13,595	1333,2
Миллиметр водяного столба	9,8·665	7,3556·10 ⁻²	1	0,98·665·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,96784·10 ⁻⁴	1	98,0665
Бар	10 ⁵	750,24	10197,2	1	1,01972	0,986923	10197,2	10 ⁶
Атмосфера техническая, кгс/см ²	9,80665·10 ⁴	735,559	10 ⁴	0,980665	1	0,96784	10 ⁴	980,665·10 ³
Атмосфера физическая	1,01325·10 ⁵	760	10332,27	1,01325	1,033227	1	10332,27	101,325·10 ⁴
Килограмм-сила на квадратный метр	9,80665	7,3556·10 ⁻²	1	0,980665·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,96784·10 ⁻⁴	1	98,0665
Дин на квадратный сантиметр	0,1	7,5·24·10 ⁻⁴	1,0197·10 ⁻²	10 ⁻⁶	1,0197·10 ⁻⁶	0,98692·10 ⁻⁶	1,0197·10 ⁻²	1

Таблица 1.4. Соотношение между единицами энергии

Единица	Дж	эрг	кВт·ч			эВ	К
Джоуль	1	10 ⁷	1,01972·10 ⁻¹	2,7777·10 ⁻⁷	3,7767·10 ⁻⁷	2,3885·10 ⁻¹	0,7244·10 ²³
Эрг	10 ⁻⁷	1	1,01972·10 ⁻⁸	2,7777·10 ⁻¹⁴	3,7767·10 ⁻¹⁴	2,3885·10 ⁻⁸	0,7244·10 ¹⁶
Килограмм-сила-метр	9,80665	9,8·665·10 ⁷	1	2,724·10 ⁻⁶	3,737·10 ⁻⁶	2,3423	0,7104·10 ²⁴
Киловатт-час	3,6·10 ⁶	3,6·10 ¹³	3,68·10 ⁵	1	1,3596	0,8598·10 ⁶	2,607·10 ²⁹
Лошадиная сила-час	2,6478·10 ⁶	2,6478·10 ¹³	2,7·10 ⁵	0,7355	1	0,6324·10 ⁶	1,918·10 ²⁹
Калория	4,1868	4,1868·10 ⁷	4,2693·10 ⁻¹	1,1626·10 ⁻⁶	1,5812·10 ⁻⁶	10 ⁻³	3,033·10 ²³
Килокалория	4·1868·10 ³	4,1868·10 ¹⁰	4,2693·10 ²	1,1626·10 ⁻³	1,5812·10 ⁻³	1	3,033·10 ²⁶
Электрон-вольт	1,602·10 ⁻¹⁹	1,602·10 ⁻¹²	1,633·10 ⁻²⁰	4,448·10 ⁻²⁶	0,605·10 ⁻²⁶	3,826·10 ⁻²⁰	1,1603·10 ⁴
Кельвин	1,38·10 ⁻²³	1,38·10 ⁻¹⁶	1,407·10 ⁻²⁴	3,834·10 ⁻³⁰	0,5213·10 ⁻²⁹	3,297·10 ⁻²⁴	1

Таблица 1.5. Соотношение между единицами мощности

Единица	Вт	эрг/с	кВт	м/с	кал/с	ккал/ч
Ватт	1	10^7	10^{-3}	0,10197	0,23884	0,8598
Эрг в секунду	10^7	1	10^{-10}	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$0,23884 \cdot 10^{-7}$	$0,8598 \cdot 10^{-7}$
Киловатт	10^3	10^{10}	1	101,97	238,84	859,84
Лошадиная сила	735,499	$0,7355 \cdot 10^{10}$	0,7355	75	175,7	632,42
Килограмм-сила-метр в секунду	9,80665	$9,80665 \cdot 10^7$	$9,8065 \cdot 10^{-3}$	1	2,3423	8,4324
Калория в секунду	4,1868	$4,1868 \cdot 10^7$	$4,1868 \cdot 10^{-3}$	0,42693	1	3,6
Килокалория в час	1,163	$1,163 \cdot 10^7$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	0,11859	0,2778	1

Таблица 1.6. Соотношение между единицами теплопроводности

Единица	Вт/(м·К)	Вт/(см·К)	$\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$
Ватт на метр-кельвин	1	0,01	0,8598	$2,389 \cdot 10^{-3}$
Ватт на сантиметр-кельвин	100	1	85,98	0,2389
Килокалория в час на метр-градус Цельсия	1,163	0,01163	1	$2,778 \cdot 10^{-3}$
Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия	$4,1868 \cdot 10^2$	4,1868	360	1

Таблица 1.7 Соотношение между единицами теплопередачи

Единица	Вт/(м ² ·К)	кВт/(м ² ·К)	Вт/(см ² ·К)	эрг/(см ² ·с·К)	ккал/(м ² ·с·°С) × 10 ⁻⁶	кал/(см ² ·с·°С) × 10 ⁻⁶
Ватт на метр в квадрате-кельвин	1	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ³	0,8598	23,89·10 ⁻⁶
Киловатт на метр в квадрате-кельвин	10 ³	1	0,1	10 ⁶	859,8	23,89·10 ⁻³
Ватт на сантиметр в квадрате-кельвин	10 ⁴	10	1	10 ⁷	8598	0,2389
Эрг на сантиметр в квадрате-секунда-кельвин	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	1	859,8 × 10 ⁻⁶	23,89·10 ⁻⁹
Килокалория на метр в квадрате-час-градус Цельсия	1,163	1,163 × 10 ⁻³	116,3·10 ⁻⁶	116,3·10 ³	1	27,78·10 ⁻⁶
Калория на сантиметр в квадрате-секунда-градус-Цельсия	4,1868 × 10 ⁴	41,868	4,1868	41,868·10 ⁶	3600	1

Таблица 1.8. Перевод температурных шкал

Температура в градусах	Кельвин	Цельсий	Ренкин	Фаренгейт
Кельвин T_K	T_K	$t_C + 273,15$	$T_R/1,8$	$(t_F + 459,67)/1,8$
Цельсий t_C	$T_K - 273,15$	t_C	$(T_R - 491,67)/1,8$	$(t_F - 32)/1,8$
Ренкин T_R	$1,8 T_K$	$(t_C + 273,15) 1,8$	T_R	$t_F + 459,67$
Фаренгейт t_F	$1,8 T_K - 459,67$	$1,8 t_C + 32$	$T_R - 459,67$	t_F
Соотношение единиц температур	$1^\circ R = \frac{5}{9} K = 0,556 K$ $1^\circ F = 0,556^\circ C$		$1 K = \frac{9}{5}^\circ R = 1,8^\circ R$ $1^\circ C = 1,8^\circ F$	
Соотношение разностей температур	$\Delta t_F / \Delta t_C = 9/5$		$\Delta t_C / \Delta t_F = 5/9$	

Таблица 1.9. Соотношение между единицами магнитной индукции

Единица	Тл	Гс (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0
Тесла	1	10 ⁴	3,34·10 ⁻⁷
Гаусс (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	10 ⁻⁴	1	3,34·10 ⁻¹¹
Ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	3·10 ⁹	3·10 ¹⁰	1

Таблица 1.10. Соотношение между единицами напряженности магнитного поля

Единица	А/м	Э (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	А·в/см
Ампер на метр	1	1,26·10 ⁻²	3,77·10 ⁸	10 ⁻²
Эрстед (ед. СГС, СГСМ и СГС μ_0)	79,6	1	3,10 ¹⁰	0,796
Ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	2,65·10 ⁻⁹	3,34·10 ⁻¹¹	1	2,65·10 ⁻¹¹
Ампер-виток на сантиметр	10 ²	1,26	3,77·10 ¹⁰	1

Таблица 1.11. Соотношение между единицами магнитного потока

Единица	Вб	Мкс	СГСЭ и СГС ϵ_0
Вебер	1	10 ⁸	3,34·10 ⁻³
Максвелл	10 ⁻⁸	1	3,34·10 ⁻¹¹
Ед. СГСЭ и СГС ϵ_0	3·10 ⁹	3·10 ¹⁰	1

Таблица 1.12 Немеетрические единицы, применяемые в Великобритании и США, и их перевод (согласно рекомендации R-31 Международной организации по стандартизации)

Величина	Единица		Перевод в единицы СИ или кратные и дробные от них
	Наименование	Обозначение	
Длина	ярд	yd	0,9144 м (точно)
	фут	ft	0,3048 м (точно)
Площадь	дюйм	in	0,0254 м (точно)
	миля	mile	1609,344 м (точно)
Объем	морская миля	—	1 852 м (точно)
	квадратный ярд	yd ²	0,836 127 м ²
	квадратный фут	ft ²	0,0929030 м ²
	квадратный дюйм	in ²	6,4516 см ² (точно)
	кубический ярд	yd ³	0,764555 м ³
	кубический фут	ft ³	28,3168 дм ³
	кубический дюйм	in ³	16,3871 см ³
	галлон (английский)	gal(UK)	4,54609 дм ³
	галлон (американский)	pt(UK)	0,568261 дм ³
	жидкостная унция (английская)	fl-oz(UK)	28,4130 см ³
	бушель (английский)	—	36,3687 дм ³
	галлон (США)	gal(US)	3,78543 дм ³
	жидкостная пинта (США)	liq-pt(US)	0,473179 дм ³
	жидкостная унция (США)	fl-oz(US)	29,5737 см ³
	нефтяной баррель (США)	—	158,988 дм ³
	бушель (США)	bu(US)	35,2393 дм ³
	сухая пинта (США)	drypt(US)	0,550614 дм ³
	сухой баррель (США)	bbl(US)	115,628 дм ³
Скорость	фут в секунду	ft/s	0,3048 м/с (точно)
	миля в час	mile/h	0,44704 м/с (точно)
Ускорение	фут на секунду в квадрате	ft/s ²	0,3048 м/с ² (точно)
	фунт (торговый)	lb	0,453592 37 кг
Масса	слэг	—	14,5939 кг
	гран	gr	64,79891 мг
	унция (торговая)	oz	28,3495 г
	центнер	cwt	50,8023 кг
	короткий центнер	sh cwt	45,3592 кг
	тонна	—	1016,05 кг
	короткая тонна	sh th	907,185 кг
	тройская унция	oztr(UK)	31,1035 г
Плотность	унция аптекарская	ozt(US)	31,1035 г
	фунт на кубический фут	lb/ft ³	16,0185 кг/м ³
		pdl	0,138255 Н