

# КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## Основные законы и формулы

1 Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = m c^2$$

2 Импульс фотона

$$p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

3 Масса фотона

$$m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

4 Энергетический поток

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

5 Энергетическая светимость (излучательность)

$$R_\varepsilon = \frac{d\Phi}{dS}$$

6 Спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность)

$$r_{\lambda T} = \frac{dR_\varepsilon}{d\lambda} \quad \text{или} \quad r_{\nu T} = \frac{dR_\varepsilon}{d\nu}$$

7 Закон Стефана – Больцмана

$$R_\varepsilon = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  - постоянная Стефана-Больцмана

8 Излучательность серого тела с коэффициентом черноты (коэффициентом излучения)  $a_T$

$$R_\varepsilon = a_T \sigma T^4$$

9 Закон смещения Вина (первый закон Вина)

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где  $b=2,9 \cdot 10^{-3} \text{м}\cdot\text{К}$

10 Второй закон Вина

$$(r_{\lambda T})_{\max} = cT^5,$$

где  $c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$

11 Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + W_{\text{к max}}$$

а) для скорости фотоэлектрона  $v \ll c$

$$W_{\text{к max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

б) для скорости фотоэлектрона  $v \sim c$

$$W_{\text{к max}} = (m - m_0)c^2 = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

12 Связь между максимальной кинетической энергией фотоэлектронов и задерживающим напряжением  $U_3$

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$$

13 Закон красной границы для фотоэффекта

$$h\nu_0 = A_{\text{вых}}$$

14 Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

15 Комптоновская длина волны

$$\lambda_k = \Lambda = \frac{h}{m_0 c}$$

16 Давление света

$$p = E_e (1 + \rho) / c \quad \text{или} \quad \rho = w (1 + \rho)$$

## Примеры решения задач

**Задача 1.** Максимум спектральной плотности излучательности Солнца соответствует длине волны  $\lambda_m = 500 \text{ нм}$ . Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определить: 1) излучательность  $R_\odot$  Солнца; 2) поток энергии  $\Phi$ , излучаемый Солнцем; 3) массу  $m$  электромагнитных волн ( всех длин) излучаемых Солнцем за 1с.

Дано:

$$\lambda_m = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$R_\odot - ? \quad \Phi - ? \quad m - ?$$

Решение: 1) Излучательность  $R_\odot$  абсолютно черного тела определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$R_\odot = \sigma T^4 \quad (10.1)$$

Температуру излучающей поверхности можно определить по первому закону Вина

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

следовательно,

$$T = \frac{b}{\lambda_m}.$$

Подставив температуру в формулу (10.1), получим:

$$R_\odot = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^4. \quad (10.2)$$

Проверим единицы в формуле (10.2):

$$[R_\odot] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{м}^{-4} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Единица  $R_\odot$  верна, следовательно, верна и формула (10.2).

Подставим числовые значения в единицах СИ, значения  $\sigma$  и  $b$  приведены в таблице 1:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}; \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}; \quad \lambda_m = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$$R_\odot = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 64 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 64 \text{ МВт/м}^2.$$

2) Поток энергии  $\Phi$ , излучаемый Солнцем, равен произведению излучательности Солнца на площадь его поверхности  $S$ :

$$\Phi = R_9 \cdot S \quad \text{или} \quad \Phi = R_9 \cdot 4\pi r^2,$$

где  $r$  – радиус Солнца. По справочным данным (табл.20)  $r = 6,95 \cdot 10^8$  м

$$[\Phi] = \frac{Вт}{м^2} \cdot м^2 = Вт.$$

$$\Phi = 64 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

3) Массу всех длин электромагнитных волн, излучаемых Солнцем за 1с, определим, применив закон пропорциональности энергии и массы

$$E = m \cdot c^2.$$

Т.к. энергия электромагнитных волн, излучаемых за время  $t$ , равна произведению потока энергии (мощности излучения) на время

$$E = \Phi \cdot t,$$

то

$$\Phi \cdot t = m \cdot c^2,$$

следовательно,

$$m = \frac{\Phi \cdot t}{c^2}.$$

Проверим единицы:

$$[m] = \frac{Вт \cdot с}{м^2 / с^2} = \frac{Вт \cdot с^3}{м^2} = \frac{кВт \cdot м^2 \cdot с^3}{с^3 \cdot м^2} = кг.$$

Произведем вычисления:

$$m = \frac{3,9 \cdot 10^{26} \cdot 1}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4 \cdot 10^9 \text{ кг} = 4 \text{ Тг.}$$

Ответ:  $R_9 = 64 \text{ МВт/м}^2$ ;  $\Phi = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ ;  $m = 4 \text{ Тг}$ .

**Задача 2.** Длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, равна 0,58 мкм. Определить максимальную излучательную способность  $(r_{\lambda T})_{max}$ , рассчитанную на  $\Delta\lambda = 1$  нм, вблизи  $\lambda_m$ .

Дано:

$$\lambda_m = 0,58 \text{ мкм} = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\Delta\lambda = 1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$$

$$(r_{\lambda T})_{max} - ?$$

Решение: Максимальная спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) определяется по второму закону Вина:

$$(r_{\lambda T})_{max} = cT^5, \quad (10.3)$$

где  $c$  - постоянная второго закона Вина,  $T$  – абсолютная температура. Температуру определим из первого закона Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad \text{и} \quad T = \frac{b}{\lambda_m}.$$

Подставим температуру в формулу (10.3):

$$(r_{\lambda T})_{max} = c \cdot \left(\frac{b}{\lambda_m}\right)^5 \quad (10.4)$$

$$[(r_{\lambda T})_{max}] = \frac{Вт}{м^2 \cdot нм \cdot К^5} \cdot \frac{м^5 \cdot К^5}{м^5} = \frac{Вт}{м^2 \cdot нм}$$

В справочных данных (см. табл.1)  $c$  задано в единицах СИ, в которых единичный интервал длин волн  $\Delta\lambda = 1м$ . По условию же задачи требуется определить  $(r_{\lambda T})_{max}$ , рассчитанную на  $\Delta\lambda = 1 нм$ , поэтому значение  $c$  в единицах СИ пересчитаем на заданный интервал длин волн:

$$c = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^3 \cdot К^5} = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^2 \cdot м \cdot К^5} = 1,3 \cdot 10^{-14} \frac{Вт}{м^2 \cdot нм \cdot К^5}$$

Произведем расчеты по формуле (10.4):

$$(r_{\lambda T})_{max} = 1,3 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{0,58 \cdot 10^{-6}}\right)^5 = 40,6 \cdot 10^3 \frac{Вт}{м^2 \cdot нм} = 40,6 \frac{кВт}{м^2 \cdot нм}.$$

Ответ:  $(r_{\lambda T})_{max} = 40,6 \frac{кВт}{м^2 \cdot нм}.$

**Задача 3.** Определить максимальную скорость  $v_{max}$  фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $\lambda_1 = 0,155 мкм$ ; 2)  $\gamma$  - излучением с длиной волны  $\lambda_2 = 1 пм$ .

*Дано:*

$$\lambda_1 = 0,155 мкм = 0,155 \cdot 10^{-6} м$$

$$\lambda_2 = 1 пм = 1 \cdot 10^{-12} м$$

$$v_{max 1} - ? \quad v_{max 2} - ?$$

*Решение:* Максимальную скорость фотоэлектрона можно определить из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\varepsilon = A_{вых} + W_{к max}, \quad (10.5)$$

где  $\varepsilon$  - энергия фотонов, падающих на поверхность металла;  $A_{вых}$  - работа выхода;  $W_{к max}$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Энергия фотона вычисляется также по формуле

$$\varepsilon = h \frac{c}{\lambda}, \quad (10.6)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\lambda$  - длина волны.

Кинетическая энергия электрона может быть выражена или по классической формуле

$$W_k = \frac{m_0 v^2}{2}, \quad (10.7)$$

или по релятивистской формуле

$$W_k = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad (10.8)$$

в зависимости от того, какая скорость сообщается фотоэлектрону. Скорость фотоэлектрона зависит от энергии фотона, вызывающего фотоэффект: если энергия  $\varepsilon$  фотона много меньше энергии покоя  $E_0$  электрона, то может быть применена формула (10.7), если же  $\varepsilon$  сравнима по величине с  $E_0$ , то вычисления по формуле (10.7) приводит к ошибке, во избежание которой необходимо кинетическую энергию фотоэлектрона выразить по формуле (10.8).

1. Вычислим энергию фотона ультрафиолетовых лучей по формуле (10.6):

$$\varepsilon_1 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,55 \cdot 10^{-7}} \text{ Дж} = 1,28 \cdot 10^{-18} \text{ Дж},$$

или

$$\varepsilon_1 = \frac{1,28 \cdot 10^{-18}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 8 \text{ эВ}.$$

Полученная энергия фотона (8эВ) много меньше энергии покоя электрона (0,51 МэВ). Следовательно, для данного случая кинетическая энергия фотоэлектронов в формуле (10.5) может быть выражена по классической формуле (10.7):

$$\varepsilon_1 = A_{\text{вых}} + \frac{m_0 v_{\text{max } 1}^2}{2},$$

откуда

$$v_{\text{max } 1} = \sqrt{\frac{2(\varepsilon_1 - A)}{m_0}}. \quad (10.9)$$

Проверим единицы:

$$[v_{\max 1}] = \sqrt{\frac{2[\varepsilon_1 - A]}{[m_0]}} = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2}{\text{кг}}} = \text{м/с}.$$

Значения работы выхода  $A_{\text{вых}}$  и массы покоя электрона  $m_0$  возьмем из справочных табл. 15 и 14:  $A_{\text{вых}} = 7,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4,7 \text{ эВ}$ ;  $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ . Подставив числовые значения в формулу (10.9), найдем

$$v_{\max 1} = \sqrt{\frac{2(1,28 \cdot 10^{-18} - 0,75 \cdot 10^{-18})}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 1,08 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

2. Вычислим энергию фотона  $\gamma$  - лучей:

$$\varepsilon_2 = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-12}} \text{ Дж} = 1,99 \cdot 10^{-13} \text{ Дж},$$

или

$$\varepsilon_2 = \frac{1,99 \cdot 10^{-13}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 1,24 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 1,24 \text{ МэВ}.$$

Работа выхода электрона ( $A = 4,17 \text{ эВ}$ ) пренебрежимо мала по сравнению с энергией фотона ( $\varepsilon_2 = 1,24 \text{ МэВ}$ ), поэтому можно принять, что максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии фотона:  $W_{\max} = \varepsilon_2 = 1,24 \text{ МэВ}$ ). Т.к. в данном случае кинетическая энергия электрона больше его энергии покоя, то для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу кинетической энергии

$$W_{k \max} = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right).$$

Выполнив преобразования, найдем

$$\beta = \frac{\sqrt{(2E_0 + W) \cdot W}}{E_0 + W}.$$

Заметив, что  $v = c \cdot \beta$  и  $W_{k \max} = \varepsilon_2$ , получим

$$v_{\max 2} = c \frac{\sqrt{(2E_0 + \varepsilon_2) \varepsilon_2}}{E_0 + \varepsilon_2}.$$

$$[v_{\max 2}] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\sqrt{\text{Дж}^2}}{\text{Дж}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Сделаем подстановку числовых значений величин и произведем вычисления:

$$v_{\max 2} = 3 \cdot 10^8 \frac{\sqrt{(2 \cdot 0,51 + 1,24) \cdot 1,24}}{0,51 + 1,24} \text{ м/с} = 2,85 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Ответ:  $v_{\max 1} = 1,08 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ;  $v_{\max 2} = 2,85 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

**Задача 4.** В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол  $\theta = 90^\circ$ . Энергия рассеянного фотона  $\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$ . Определить энергию фотона  $\varepsilon_1$  до рассеяния.

*Дано:*  
 $\theta = 90^\circ$   
 $\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$   
 $\varepsilon_1 - ?$

*Решение:* Согласно формуле Комптона изменение длины волны фотона при рассеянии на электроне будет равно

$$\Delta\lambda = 2 \frac{h}{m_0 \cdot c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (10.10)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $c$  – скорость света в вакууме. Выразим  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  через энергии  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  соответствующих фотонов, воспользовавшись формулой  $\varepsilon = h \frac{c}{\lambda}$ , и умножим числитель и знаменатель правой части равенства (8.10) на скорость света  $c$ . Тогда получим:

$$\frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = 2 \frac{hc}{m_0 c^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} = \frac{2}{E_0} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (10.11)$$

где  $E_0 = m_0 \cdot c^2$  – энергия покоя электрона.

Выразим из формулы (10.11) искомую энергию  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 E_0}{E_0 - 2\varepsilon_2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (10.12)$$

$$[\varepsilon_1] = \frac{\text{МэВ} \cdot \text{МэВ}}{\text{МэВ}} = \text{МэВ.}$$

Подставим в формулу (10.12) числовые значения, взяв  $E_0$  из справочной таблицы 14:

$$\varepsilon_1 = \frac{0,4 \cdot 0,511}{0,511 - 2 \cdot 0,4 \cdot 0,5} = 1,85 \text{ МэВ.}$$

Ответ:  $\varepsilon_1 = 1,85 \text{ МэВ}$ .

**Задача 5.** Пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda=663$  нм падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии  $\Phi=0,6$  Вт. Определить силу  $F$  давления, испытываемую этой поверхностью, а также число  $N$  фотонов, падающих на неё за время  $t = 5$  с.

Дано:  
 $\lambda=663$  нм  
 $\Phi=0,6$  Вт  
 $t = 5$  с  


---

 $N=?$   $F=?$

Решение: Сила светового давления на поверхность равна произведению светового давления  $p$  на площадь  $S$  поверхности:

$$F = p \cdot S \quad (10.13)$$

Световое давление может быть найдено также по формуле:

$$p = E_e(1 + \rho)/c \quad (10.14)$$

Подставляя выражение (10.14) в формулу (10.13), получим:

$$F = E_e \cdot S \cdot (\rho + 1)/c \quad (10.15)$$

Так как произведение облучённости  $E_e$  на площадь  $S$  поверхности равно потоку  $\Phi$  энергии излучения, падающего на поверхность, то выражение (10.15) можно записать в виде:

$$F = \frac{\Phi}{c}(\rho + 1)$$

Проверим единицы:

$$[F] = \text{Вт} \cdot \text{с} / \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{с} \cdot \text{м} = \text{Н}$$

Подставим числовые значения, при этом учтем, что для зеркальной поверхности  $\rho = 1$ , и произведём расчёты:

$$F = 0,6 \cdot 2 / 3 \cdot 10^8 = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Н} = 4 \text{ нН.}$$

Ответ:  $F = 4$  нН.

## П Р И Л О Ж Е Н И Е

Таблица 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$G$	6,67·10 <sup>-11</sup> м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Число Авогадро	$N_A$	6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Универсальная газовая постоянная	$R$	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k$	1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К
Элементарный заряд	$e$	1,60·10 <sup>-19</sup> Кл
Скорость света в вакууме	$c$	3,00·10 <sup>8</sup> м/с
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1·10 <sup>-31</sup> кг
Масса покоя протона	$m_p$	1,67·10 <sup>-27</sup> кг
Нормальные условия: давление	$P$	1,01·10 <sup>5</sup> Па
температура	$T$	273 К
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	4π·10 <sup>-7</sup> Гн/м
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	5,67·10 <sup>-8</sup> $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
Постоянная Вина (первый закон)	$b$	2,9 ·10 <sup>-3</sup> м·К
Постоянная Вина (второй закон)	$c$	1,3 ·10 <sup>-5</sup> Вт/(м <sup>3</sup> ·К <sup>5</sup> )
Постоянная Планка	$h$	6,63·10 <sup>-34</sup> Дж·с
	$\hbar$	1,05·10 <sup>-34</sup> Дж·с
Постоянная Ридберга	$R$	1,1·10 <sup>7</sup> м <sup>-1</sup>
	$R'$	3,3·10 <sup>15</sup> с <sup>-1</sup>
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	2,18·10 <sup>-18</sup> Дж (13,6эВ)
Атомная единица массы	$1a.e.m$	1,660·10 <sup>-27</sup> кг
Радиус Бора	$a_0$	0,529·10 <sup>-10</sup> м
Модуль Юнга для стали	$E$	0,2 ТПа

Таблица 2. Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Твердое тело	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Твердое тело	Плотность кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	2,70·10 <sup>3</sup>	Железо	7,88·10 <sup>3</sup>	Свинец	11,3·10 <sup>3</sup>
Барий	3,50·10 <sup>3</sup>	Литий	0,53·10 <sup>3</sup>	Серебро	10,5·10 <sup>3</sup>
Ванадий	6,02·10 <sup>3</sup>	Медь	8,93·10 <sup>3</sup>	Цезий	1,90·10 <sup>3</sup>
Висмут	9,80·10 <sup>3</sup>	Никель	8,90·10 <sup>3</sup>	Цинк	7,15·10 <sup>3</sup>
Латунь	8,4·10 <sup>3</sup>	Сталь	7,70·10 <sup>3</sup>	Фарфор	2,3·10 <sup>3</sup>

Таблица 3. Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Жидкость	Плотность кг/м <sup>3</sup>
Вода (при 4 °С)	1,00·10 <sup>3</sup>	Сероуглерод	1,26·10 <sup>3</sup>
Глицерин	1,26·10 <sup>3</sup>	Спирт	0,80·10 <sup>3</sup>
Ртуть	13,6·10 <sup>3</sup>	Касторовое масло	0,9·10 <sup>3</sup>
Машинное масло	0,9·10 <sup>3</sup>	Нефть	0,85·10 <sup>3</sup>

Таблица 4. Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Газ	Плотность кг/м <sup>3</sup>
Аргон	1,78	Гелий	0,18
Водород	0,09	Кислород	1,43
Воздух	1,29	Азот	1,25

Таблица 5. Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d·10 <sup>10</sup> , м	Динамическая вязкость η, мкПа·с	Теплопроводность α, мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	0,27	17,2	24,1
Гелий	0,22	18,9	142
Кислород	0,29	19,8	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

Таблица 6. Динамическая вязкость η жидкостей при 20 °С

Вещество	Динамическая вязкость η, мПа·с	Вещество	Динамическая вязкость η, мПа·с
Вода	1,00	Масло машинное	100
Глицерин	1480	Ртуть	1,58
Масло касторовое	987		

Таблица 7. Молярные массы некоторых газов

Газ	Молярная масса $\mu \cdot 10^3$ , кг/моль	Газ	Молярная масса $\mu \cdot 10^3$ , кг/моль
Гелий	4	Углерод	24
Аргон	40	Азот	28
Неон	20	Воздух	29
Водород	2	Пары воды	18
Кислород	32		

Таблица 8. Удельная теплоемкость

Вещество	Удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К)	Вещество	Удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К)
Вода	4190	Нихром	220
Лед	2100	свинец	126

Таблица 9. Удельная теплота плавления

Вещество	Удельная теплота плавления $\lambda$ , Дж/кг
Лед	$33,5 \cdot 10^4$
Свинец	$2,3 \cdot 10^4$

Таблица 10. Удельная теплота парообразования

Вещество	Удельная теплота парообразования $r$ , Дж/кг
Вода	$22,5 \cdot 10^5$
Эфир	$6,68 \cdot 10^5$

Таблица 11. Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Парафин	2,0	Вода	81
Стекло	7,0	Масло трансформаторное	2,2

Таблица 12. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление металлов, Ом·м	Металл	Удельное сопротивление металлов, Ом·м
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Никелин	$4 \cdot 10^{-7}$		

Таблица 13. Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

Таблица 14. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	$m_0$		$E_0$	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный мезон $\pi$ -	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

Таблица 15. Работа выхода электронов

Металл	Дж	эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

Таблица 16. Относительные атомные массы (атомные веса)  $A$  и порядковые номера  $Z$  некоторых элементов

Элемент	Химический символ	$A$	$Z$
Азот	N	14	7
Алюминий	Al	27	13
Водород	H	1	1
Вольфрам	W	184	74
Гелий	He	4	2
Железо	Fe	56	26
Золото	Au	197	79
Калий	K	39	19
Кальций	Ca	40	20
Кислород	O	16	8
Магний	Mg	24	12
Марганец	Mn	55	25
Медь	Cu	64	29
Молибден	Mo	96	42
Натрий	Na	23	11
Никель	Ni	59	28
Платина	Pt	195	78
Сера	S	32	16
Серебро	Ag	108	47
Уран	U	238	92
Углерод	C	12	6
Хлор	Cl	35	17

Таблица 17. Периоды полураспада радиоактивных изотопов.

Изотоп	Символ	Период полураспада
Магний	${}_{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин
Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 суток
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 года
Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	27 лет
Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 суток
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 суток
Торий	${}_{90}\text{Th}^{229}$	$7 \cdot 10^3$ лет
Уран	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Радий	${}_{88}\text{Ra}^{219}$	$10^{-3}$ сек
	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	$1,62 \cdot 10^3$ лет

Таблица 18. Массы нейтрона и некоторых атомов

Изотоп	Символ	Масса (а.е.м)
Нейтрон	${}_0n^1$	1,00867
Водород	${}_1H^1$	1,00783
	${}_1H^2$	2,01410
	${}_1H^3$	3,01605
Гелий	${}_2He^3$	3,01603
	${}_2He^4$	4,00260
Литий	${}_3Li^6$	6,01513
	${}_3Li^7$	7,01601
Бериллий	${}_4Be^7$	7,01693
	${}_4Be^9$	9,01219
Бор	${}_5B^{10}$	10,01294
	${}_5B^{11}$	11,00930
Углерод	${}_6C^{12}$	12,00000
	${}_6C^{13}$	13,00335
	${}_6C^{14}$	14,00324
Азот	${}_7N^{14}$	14,00307
Кислород	${}_8O^{16}$	15,99491
	${}_8O^{17}$	16,99913
Магний	${}_{12}Mg^{23}$	22,99414

Таблица 19. внесистемные единицы, допущенные к применению наравне с единицами СИ, их связь с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Название	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	$1\text{т} = 10^3 \text{ кг}$
	атомная единица массы	а.е.м.	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Время	минута	мин	$1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$
	час	ч	$1\text{ч} = 3600 \text{ с}$
	сутки	сут	$1 \text{ сут} = 86400 \text{ с}$
	год	год	$1 \text{ год} = 365,25 \text{ сут} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$
Работа, энергия	электрон -вольт	эВ	$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Таблица 20. Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

Таблица 21. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
экса	Э	$10^{18}$	деци	д	$10^{-1}$
пэта	П	$10^{15}$	санتي	с	$10^{-2}$
тера	Т	$10^{12}$	милли	м	$10^{-3}$
гига	Г	$10^9$	микро	мк	$10^{-6}$
мега	М	$10^6$	нано	н	$10^{-9}$
кило	к	$10^3$	пико	п	$10^{-12}$
гекто	г	$10^2$	фемто	ф	$10^{-15}$
дека	да	$10^1$	атто	а	$10^{-18}$