

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ КОНТИНГЕНТОМ СТУДЕНТОВ

---

**В.И. Веретельник, Ю.А. Сивов,  
Н.Д. Толмачева, В.Д. Хоружий**

## **СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В ВУЗЫ**

### **Часть II**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Под редакцией профессора Ю.И. Тюрина

3-е издание, исправленное

Издательство  
Томского политехнического университета  
2015

УДК 53(076.5)

ББК 22.3я73

В33

**Веретельник В.И.**

В33      Сборник вопросов и задач по физике для поступающих в вузы: учебное пособие. Часть 2 / В.И. Веретельник, Ю.А. Сивов, Н.Д. Толмачева, В.Д. Хоружий; под ред. проф. Ю.И. Тюрина; Томский политехнический университет. – 3-е изд., испр. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 208 с.

Сборник содержит задачи для самостоятельного решения, а также примеры решения задач по следующим разделам физики: «Постоянный ток. Электромагнетизм», «Колебания и волны», «Оптика. Световые кванты», «Специальная теория относительности. Физика атома и атомного ядра».

Предназначен для слушателей подготовительных отделений вузов, учащихся старших классов средних школ, преподавателей физики.

**УДК 53(076.5)**

**ББК 22.3я73**

*Рецензенты*

Председатель ГЭК ЕГЭ по физике Томской области,  
старший преподаватель кафедры  
общей и экспериментальной физики ТГУ

*П.А. Назаров*

Кандидат технических наук, профессор ТУСУРа

*А.Г. Рупп*

© ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2010

© Веретельник В.И., Сивов Ю.А.,  
Толмачева Н.Д., Хоружий В.Д., 2010

© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2015

## 5. ПОСТОЯННЫЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### Содержание раздела

Сила тока. Напряжение. Закон Ома для однородного участка цепи. Электрическое сопротивление. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной электрической цепи. Параллельное соединение проводников. Последовательное соединение проводников. Измерение тока и напряжения. Работа электрического тока. Мощность электрического тока. Сверхпроводимость. Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях и газах. Законы Фарадея для электролиза. Полупроводники. Собственная проводимость полупроводников. Примесная проводимость полупроводников.

Магнитный момент. Индукция магнитного поля. Сила Ампера. Правило левой руки. Сила Лоренца. Явление электромагнитной индукции. Магнитный поток. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля. Ускорители заряженных частиц. Циклические и линейные ускорители. Принцип действия циклотрона.

### Основные законы и формулы

#### *Постоянный ток*

- Сила электрического тока

$$I = \frac{dq}{dt},$$

где  $dq$  – величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время  $dt$ .

- Сила постоянного электрического тока

$$I = \frac{q}{t},$$

где  $q$  – заряд, протекший через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

- Плотность постоянного тока

$$j = I/S, \quad j = qnv,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника,  $q$  – заряд носителя заряда,  $n$  – концентрация носителей заряда,  $v$  – скорость направленного движения носителей заряда.

- Сопротивление проводника длиной  $l$  с постоянной площадью поперечного сечения  $S$

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника.

- Сопротивление проводника при температуре  $t$

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R_0$  – сопротивление проводника при  $0$  °С,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

- Удельное сопротивление проводника при температуре  $t$

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника при  $0$  °С.

- Сопротивление последовательного соединения проводников

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

где  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – сопротивления отдельных проводников.

- Сопротивление параллельного соединения проводников

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

- Сопротивление шунта  $R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1},$

где  $R_A$  – сопротивление амперметра,  $n$  – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения амперметра.

- Дополнительное сопротивление

$$R_d = R_v(n-1),$$

где  $R_v$  – сопротивление вольтметра,  $n$  – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения вольтметра.

- Закон Ома для однородного участка цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где  $I$  – сила тока,  $U$  – напряжение на участке цепи,  $R$  – сопротивление участка цепи.

- Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r},$$

где  $I$  – сила тока в цепи,  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника,  $R$  – сопротивление внешней цепи,  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

- При последовательном соединении  $n$  источников с одинаковыми ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренними сопротивлениями  $r$  сила тока в цепи

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}.$$

- При параллельном соединении  $n$  источников с одинаковыми ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренними сопротивлениями  $r$  сила тока в цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r/n}.$$

- Работа постоянного электрического тока

$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t,$$

где  $q$  – заряд, протекший через поперечное сечение проводника сопротивлением  $R$  за время  $t$ .

- Мощность постоянного тока

$$P = \frac{A}{t} = \frac{qU}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

- Закон Джоуля – Ленца

$$Q = I^2Rt,$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемое в проводнике сопротивлением  $R$  с током силой  $I$  за время  $t$ .

- КПД источника тока  $\eta = \frac{I^2R}{I\mathcal{E}} = \frac{IR}{\mathcal{E}}.$

- Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле  $\sum_{i=1}^n I_i = 0$ , где  $n$  – число токов, сходящихся в узле.

- Второе правило Кирхгофа: в замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на всех участках контура равна алгебраической сумме электродвижущих сил:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i.$$

- Закон Фарадея для электролиза

$$m = kq = kIt,$$

где  $m$  – масса вещества, выделившегося на электроде,  $q$  – заряд, прошедший через электролит,  $k$  – электрохимический эквивалент вещества,  $I$  – сила тока,  $t$  – время протекания тока через электролит.

- Электрохимический эквивалент вещества

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

где  $F = 96500$  Кл/моль – постоянная (число) Фарадея,  $M$  – молярная масса,  $n$  – валентность химического элемента,  $M/n$  – химический эквивалент вещества.

- Объединенный закон Фарадея

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot It.$$

### Электромагнетизм

- Модуль магнитной индукции

$$B = \frac{M_{\text{макс}}}{P_{\text{м}}},$$

где  $M_{\text{макс}}$  – максимальный вращающий момент, действующий в однородном магнитном поле на рамку с магнитным моментом

$$P_{\text{м}} = IS,$$

где  $S$  – площадь рамки,  $I$  – сила тока в рамке.

- Вращающий момент, действующий на рамку, находящуюся в магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$M = IB S \sin \alpha,$$

где  $S$  – площадь рамки,  $I$  – сила тока в рамке,  $\alpha$  – угол между нормалью  $\vec{n}$  к её поверхности и направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

- Закон Ампера

$$F = IB l \sin \alpha,$$

где  $F$  – модуль силы, действующей на помещенный в магнитное поле проводник длиной  $l$  с током силой  $I$ ,  $B$  – модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

- Правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера.

- Принцип суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

- Поток магнитной индукции (магнитный поток) через плоскую поверхность площадью  $S$

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где  $B$  – модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  – угол между нормалью  $\vec{n}$  к её поверхности и направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

- Сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha,$$

где  $q$  – модуль заряда частицы,  $v$  – её скорость,  $B$  – модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  – угол между направлением скорости частицы  $\vec{v}$  и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

- Закон электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\mathcal{E}_i$  – ЭДС индукции, возникающей в замкнутом контуре, если поверхность контура пронизывается переменным магнитным потоком,  $d\Phi/dt$  – скорость изменения магнитного потока.

Знак “ – ” отражает правило Ленца: индукционный ток имеет такое направление, что созданное им магнитное поле, противодействует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток.

- ЭДС индукции в проводнике длиной  $l$ , движущемся в постоянном во времени магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ ,

$$\mathcal{E}_i = Blv \cdot \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением скорости  $\vec{v}$  проводника и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

- Магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, возникающий при протекании по этому контуру тока  $I$ ,

$$\Phi = LI,$$

где  $L$  – индуктивность контура.

- Потокосцепление катушки индуктивностью  $L$ , содержащую  $N$  витков,

$$\Psi = N\Phi = LI,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток через один виток.

- ЭДС самоиндукции:  $\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$ ,

где  $dI/dt$  – скорость изменения тока в контуре.

- Энергия магнитного поля тока силой  $I$ , проходящего по проводнику индуктивностью  $L$ ,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

## Примеры решения задач

**5.1. Закон Ома для полной цепи.** При замыкании элемента на сопротивление  $R_1 = 4,6$  Ом сила тока в цепи  $I_1 = 1,12$  А, а при замыкании на сопротивление  $R_2 = 3,6$  Ом сила тока в цепи  $I_2 = 1,4$  А. Определите силу тока  $I_{кз}$  короткого замыкания. Ответ представьте в единицах СИ.

Дано:  $R_1 = 4,6$  Ом,  $I_1 = 1,12$  А,  $R_2 = 3,6$  Ом,  $I_2 = 1,4$  А.

Определить  $I_{кз}$ .

**Решение.** Сила тока  $I_{кз}$  короткого замыкания определяется по закону Ома для полной цепи при значении внешнего сопротивления  $R = 0$ :

$$I_{кз} = \mathcal{E}/(R + r) = \mathcal{E}/r, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника тока,  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

Для нахождения неизвестных значений  $\mathcal{E}$  и  $r$ , входящих в уравнение (1), применим закон Ома для полной цепи при сопротивлениях внешней цепи  $R_1$  и  $R_2$ :

$$I_1 = \mathcal{E}/(R_1 + r). \quad (2)$$

$$I_2 = \mathcal{E}/(R_2 + r). \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) получим

$$I_1(R_1 + r) = I_2(R_2 + r). \quad (4)$$

Решая уравнение (4) относительно  $r$ , найдем

$$r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}. \quad (5)$$

Для определения  $\mathcal{E}$  нужно подставить выражение (5) для  $r$  в уравнение (2) или (3) и решить получившееся уравнение. Подставив (5), например, в (2), после преобразований получим

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_1 - R_2)}{I_2 - I_1}. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (1), (5), (6) относительно  $I_{кз}$ , найдем:

$$I_{кз} = \frac{I_1 I_2 (R_1 - R_2)}{I_1 R_1 - I_2 R_2} = 14 \text{ А}.$$

**5.2. Закон Ома для полной цепи.** Покажите, используя закон Ома для полной цепи, что если замкнутая цепь (рис. 5.1) состоит из  $n$  последовательно соединенных гальванических элементов с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , то показание идеального вольтметра

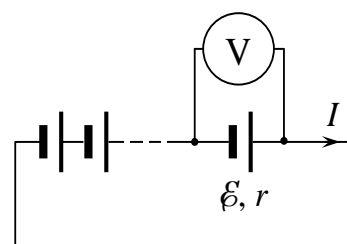


Рис. 5.1



$V$ , подключенного к зажимам одного из элементов, равно нулю. Сопротивлением соединительных проводников пренебречь.

**Решение.** Идеальный вольтметр обладает бесконечно большим сопротивлением. Поэтому можно считать, что ток через вольтметр не протекает. По закону Ома для полной цепи показания вольтметра, подключенного к зажимам одного из элементов,

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (1)$$

В случае  $n$  последовательно соединенных источников тока с внутренним сопротивлением  $r$  сила тока в цепи по закону Ома для полной цепи

$$I = n\mathcal{E}/(nr + R), \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление внешней цепи. Так как по условию задачи сопротивление внешней цепи  $R = 0$ , то уравнение (2) можно представить в виде

$$I = n\mathcal{E}/nr = \mathcal{E}/r. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), найдем:

$$U = \mathcal{E} - Ir = \mathcal{E} - (\mathcal{E}/r)r = 0.$$

**Примечание.** Полученный результат справедлив для идеализированной ситуации. В реальной ситуации, обычно  $r \ll R \ll R_V$ . В этом случае, поскольку сопротивление элемента  $r$  пренебрежимо мало, напряжение на идеальном вольтметре, равно напряжению на сопротивлении внешней цепи:  $U = \mathcal{E} - Ir \approx \mathcal{E}$ .

**5.3.** Чему равна энергия  $W$  конденсатора емкостью  $C$ , подключенного по электрической схеме, представленной на рис. 5.2, если  $C = 1$  мкФ,  $\mathcal{E} = 5$  В,  $R = 5$  Ом,  $r = 1$  Ом? Ответ представьте в микроджоулях и округлите до десятых.

Дано:  $C = 1$  мкФ,  $\mathcal{E} = 5$  В,  $R = 5$  Ом,  $r = 1$  Ом.

Определить  $W$ .

**Решение.** Энергия  $W$  заряженного конденсатора емкостью  $C$  определяется формулой

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение между обкладками конденсатора.

При определении  $U$  необходимо учесть, что для постоянного тока конденсатор представляет разрыв цепи: постоянный ток через конденсатор не проходит. Следовательно, во внешней части цепи ток течет через сопротивления  $R$ ,  $2R$ ,  $3R$ , а через сопротивления  $4R$  и  $5R$  не проте-

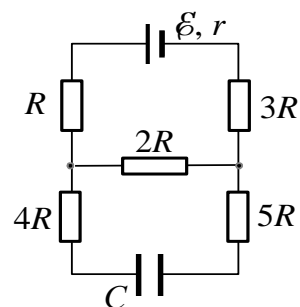


Рис. 5.2

кает. Поэтому напряжение  $U$  между обкладками конденсатора равно падению напряжения на сопротивлении  $2R$ :  $U = 2IR$ . По закону Ома для полной цепи

$$I = \mathcal{E}/(r + R + 2R + 3R). \quad (2)$$

Тогда

$$U = 2\mathcal{E}R/(r + 6R). \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), найдем:

$$W = 2C\mathcal{E}^2R^2/(6R + r)^2 = 1,3 \text{ мкДж.}$$

**Примечание.** Объяснить, что для постоянного тока конденсатор представляет разрыв цепи можно, если воспользоваться формулой для реактивного сопротивления конденсатора  $X_C = 1/(\omega C)$ . Действительно, на постоянном токе, то есть при  $\omega = 0$ , это сопротивление равно  $\infty$ , и следовательно, постоянный ток через конденсатор не может протекать.

**5.4. Плотность тока.** Суммарный импульс  $p$  электронов в прямом проводе длиной  $l = 100$  м, равен  $5 \cdot 10^{-8}$  кг·м/с. Определите силу тока  $I$ , протекающего по проводу. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа.

Дано:  $p = 5 \cdot 10^{-8}$  кг·м/с,  $l = 100$  м,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

Определить  $I$ .

**Решение.** Суммарный импульс  $N$  электронов, создающих ток в проводе,

$$p = Nmv, \quad (1)$$

где  $m$  – масса электрона,  $v$  – скорость упорядоченного движения электронов.

Сила тока  $I$  связана с плотностью тока  $j$  соотношением

$$I = jS, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения провода.

Плотность тока упорядоченного движения электронов, движущихся с дрейфовой скоростью  $v$ , определяется формулой

$$j = env, \quad (3)$$

где  $n$  – концентрация электронов,  $e$  – модуль заряда электрона.

Число  $N$  электронов в проводе длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  равно:

$$N = nSl. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (1) – (4) относительно  $I$ , найдем:

$$I = pe/(ml) \approx 88 \text{ А.}$$

**5.5. Работа источника тока.** Конденсатор емкостью  $C = 100$  мкФ, предварительно заряженный до разности потенциалов  $U = 100$  В, подключают, как показано на рис. 5.3, через резистор  $R$  к батарее с ЭДС  $\mathcal{E} = 300$  В и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением источника тока. Какое количество теплоты  $Q$  выделится в резисторе за время полной зарядки конденсатора?

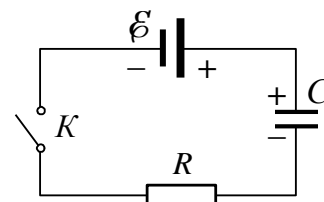


Рис. 5.3

Дано:  $C = 100$  мкФ,  $U = 100$  В,  $\mathcal{E} = 300$  В.

Определить  $Q$ .

**Решение.** Конденсатор за время полной зарядки зарядится до напряжения, равного ЭДС  $\mathcal{E}$  источника тока. По закону сохранения энергии

$$A = W_2 - W_1 + Q, \quad (1)$$

где  $A$  – работа источника тока,  $W_1$  – энергия конденсатора, заряженного до напряжения  $U$ ,  $W_2$  – энергия конденсатора, заряженного до напряжения, равного ЭДС  $\mathcal{E}$  источника тока,  $Q$  – количество теплоты, которое выделится в резисторе  $R$  при протекании постоянного тока за время полной зарядки конденсатора.

Величины заряда  $q_0$  конденсатора при разомкнутом ключе  $K$  и  $q$  после полной зарядки конденсатора соответственно равны:

$$q_0 = CU; \quad q = C\mathcal{E}. \quad (2)$$

Работа, которую совершает источник тока при зарядке конденсатора,

$$A = \mathcal{E}(q - q_0). \quad (3)$$

Энергия  $W_1$  конденсатора, заряженного до напряжения  $U$ , и энергия  $W_2$  конденсатора, заряженного до напряжения, равного ЭДС  $\mathcal{E}$  источника тока, соответственно равны:

$$W_1 = CU^2/2; \quad W_2 = C\mathcal{E}^2/2. \quad (4)$$

Используя уравнения (2) – (4), представим уравнение (1) в виде

$$\mathcal{E}(q - q_0) = \frac{C\mathcal{E}^2}{2} - \frac{CU^2}{2} + Q. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (2), (5) относительно  $Q$ , найдем:

$$Q = \mathcal{E}C(\mathcal{E} - U) - \frac{C\mathcal{E}^2}{2} + \frac{CU^2}{2} = \frac{C(\mathcal{E} - U)^2}{2} = 2 \text{ Дж}.$$

**5.6. Закон Джоуля – Ленца.** Какое сопротивление  $R$  нужно подключить к  $n$  одинаковым последовательно соединенным источникам (рис. 5.4) с ЭДС  $\mathcal{E}$  с внутренним сопротивлением  $r$ , чтобы потребляемая сопротивлением  $R$  мощность была максимальной?

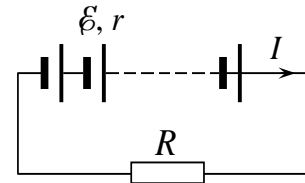


Рис. 5.4

**Решение.** Потребляемая мощность определяется формулой

$$P = I^2 R, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление внешней цепи (сопротивление нагрузки).

По закону Ома для полной цепи сила тока в цепи

$$I = n\mathcal{E}/(nr + R). \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), выразим мощность  $P$ , выделяемую на сопротивлении  $R$ , как функцию  $P(R)$ :

$$P(R) = (n\mathcal{E})^2 R / (nr + R)^2. \quad (3)$$

Для нахождения  $R$ , при котором потребляемая мощность максимальна, исследуем полученную функцию  $P(R)$  на экстремум, то есть возьмем производную от функции  $P(R)$  по  $R$  и приравняем нулю:

$$P'(R) = \frac{dP}{dR} = n^2 \mathcal{E}^2 \left[ \frac{1}{(R + nr)^2} - \frac{2R}{(R + nr)^3} \right] = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) после упрощений приведем к виду

$$R + nr - 2R = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно  $R$ , получим

$$R = nr.$$

Следовательно, максимум потребляемой мощности достигается при равенстве сопротивления  $nr$  батареи источников ЭДС сопротивлению  $R$  внешней цепи. Очевидно, в случае одного источника с внутренним сопротивлением  $r$  потребляемая мощность максимальна при  $R = r$ .

**Примечание.** Самостоятельно аналогичным образом покажите, что если  $n$  источников с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  соединены параллельно, то потребляемая мощность будет максимальной при  $R = r/n$ .

**5.7. Ток в вакууме.** Вакуумный диод, у которого анод (положительный электрод) и катод (отрицательный электрод) – параллельные пластины, работает в режиме, когда между током и напряжением выполняется соотношение  $I = aU^{3/2}$ , где  $a$  – постоянная величина. Во сколько раз увеличилось напряжение на диоде, если сила, действующая на анод из-за удара электронов, увеличилась в  $n = 4$  раза? Начальную скорость вылетающих электронов считать равной нулю.

Дано:  $I = aU^{3/2}$ ;  $F_2/F_1 = n = 4$ ;  $v_0 = 0$ .

Определить  $U_2/U_1$ .

**Решение.** По второму закону Ньютона

$$F\Delta t = N\Delta p, \quad (1)$$

где  $\Delta p = mv$  – изменение количества движения электрона при соударении с анодом,  $v$  – скорость электрона при соударении с анодом,  $N$  – число электронов, соударяющихся с анодом за время  $\Delta t$ ,  $F$  – сила, действующая в течение времени  $\Delta t$  при соударениях со стороны анода на электроны.

Представим уравнение (1) в виде

$$F = N \cdot \Delta p / \Delta t. \quad (2)$$

По теореме об изменении кинетической энергии, поскольку начальная скорость вылетающих электронов принята равной нулю, кинетическая энергия электронов, достигших анода, равная работе сил ускоряющего электрического поля,

$$A = eU = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (3)$$

Отсюда импульс  $p$ , переданный ускоренным электроном аноду,

$$p = \sqrt{2eUm} \quad \text{и} \quad \Delta p = \sqrt{2eUm}. \quad (4)$$

Число  $N$  электронов, соударяющихся с анодом за время  $\Delta t$ , можно определить как отношение суммарного заряда  $\Delta q = I\Delta t$ , перенесенного  $N$  электронами на анод за время  $\Delta t$ , к модулю  $e$  заряда электрона:

$$N = \frac{\Delta q}{e} = \frac{I\Delta t}{e} = \frac{aU^{3/2}}{e} \Delta t, \quad (5)$$

где  $\Delta q$  – заряд, протекший через диод за время  $\Delta t$ .

Решая систему уравнений (1) – (5) относительно  $F$ , получим выражение для модуля силы, действующей со стороны анода на электроны,

$$F = U^2 \sqrt{2a^2 m / e}. \quad (6)$$

По третьему закону Ньютона, с такой же по модулю силой электроны действуют на анод.

Отсюда при увеличении силы, действующей на анод со стороны электронов в  $n = 4$  раза, напряжение на аноде изменится в

$$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \sqrt{n} = 2.$$

**5.8. Закон Фарадея для электролиза.** Определите массу  $m$  меди, которая выделится при электролизе из раствора медного купороса за  $t = 200$  с, если сила тока, протекающего через электролит, изменялась по закону  $I(t) = (6 + 0,04t)$  А, где  $t$  – время в секундах. Валентность  $n$  меди принять равной 2. Ответ представьте в граммах и округлите до десятых.

Дано:  $t = 200$  с,  $I(t) = (6 + 0,04t)$  А,  $n = 2$ ,  $F = 96500$  кг/моль,  $M = 64 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Определить  $m$ .

**Решение.** По закону Фарадея для электролиза масса вещества, выделившаяся на электроде,

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} q, \quad (1)$$

где  $F$  – постоянная Фарадея,  $M$  – атомная масса меди,  $q$  – заряд, протекший через электролит за время  $t$ .

По условию задачи, сила тока, протекающего через электролит, изменялась по линейному закону. Поэтому для определения заряда  $q$  можно воспользоваться средним значением силы тока, которое в случае линейной зависимости находится как полусумма начального  $I_0$  (при  $t = 0$ ) = 6 А и конечного  $I_t$  (при  $t = 200$  с) = 14 А значений силы тока,

$$I_{\text{cp}} = \frac{I_0 + I_t}{2}.$$

Отсюда

$$q = I_{\text{cp}} t = \frac{I_0 + I_t}{2} \cdot t = 2000 \text{ Кл}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) и выполнив вычисления, найдем:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot \frac{I_0 + I_t}{2} \cdot t \approx 0,7 \text{ г}.$$

**Примечание.** Значение заряда, протекшего через электролит за время  $t = 200$  с может быть также получено интегрированием функции  $I(t) = (6 + 0,04t)$  в пределах от 0 до  $t = 200$  с.

$$q = \int_0^t I dt = \int_0^t (6 + 0,04t) dt = (6t + 0,02t^2) \Big|_0^{200} = 2000 \text{ Кл}.$$

**5.9. Сила Лоренца.** Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  (рис. 5.5). В точке  $A$  он имеет скорость  $v = 5 \cdot 10^4$  м/с, вектор которой составляет с вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  угол

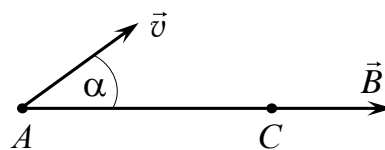


Рис. 5.5

$\alpha = 45^\circ$ . При какой величине магнитной индукции  $B$  электрон попадет при своем движении в точку  $C$ , находящуюся на одной линии с точкой  $A$ ? Расстояние  $AC = L = 3$  см. Ответ представьте в миллитеслах и округлите до сотых.

Дано:  $v = 5 \cdot 10^4$  м/с,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $AC = L = 3$  см,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

Определить  $B$ .

**Решение.** При движении заряженной частицы в однородном магнитном поле, если ее скорость  $\vec{v}$  направлена под произвольным острым углом  $\alpha$  ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) к вектору индукции  $\vec{B}$  поля частица участвует одновременно в двух движениях: равномерно вращается по окружности радиусом  $R$  со скоростью  $v_\perp = v \sin \alpha$  и поступательно движется по

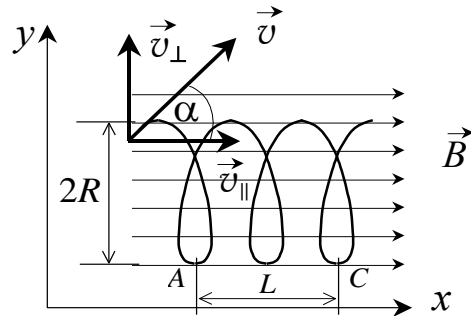


Рис. 5.6

прямой с постоянной скоростью  $v_\parallel = v \cos \alpha$  в направлении, перпендикулярном плоскости вращения. Поэтому траектория движения заряженной частицы представляет собой винтовую линию (спираль), ось которой совпадает с линией индукции магнитного поля (рис. 5.6).

Протон попадет при своем движении из точки  $A$  в точку  $C$ , находящуюся на одной линии с точкой  $A$ , если время  $t_1 = L/v_\parallel = L/(v \cos \alpha)$  движения электрона по прямой из точки  $A$  в точку  $C$  равно времени  $t_2$  вращательного движения электрона, описывающего целое число окружностей, и, следовательно, равному целому числу периодов  $T$  обращения электрона, то есть  $t_2 = kT$ , где  $k = 1, 2, \dots$  ( $k = 2$  на рис. 5.6).

$$L/v_\parallel = L/(v \cos \alpha) = kT, \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (1)$$

Период обращения протона в магнитном поле определяется формулой

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}. \quad (2)$$

При движении протона в однородном магнитном поле по окружности с постоянной по модулю скоростью роль центростремительной силы выполняет сила Лоренца, равная  $e v B \sin \alpha$ , где  $e$  – элементарный электрический заряд. Воспользовавшись формулой для силы Лоренца, запишем второй закон Ньютона для протона, движущегося в однородном магнитном поле по окружности с постоянной по модулю скоростью,

$$\frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R} = evB \sin \alpha. \quad (3)$$

Из (3) получим выражение для радиуса  $R$  окружности

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (1) – (4) относительно  $B$  и выполнив вычисления, найдем:

$$B = \frac{2\pi k m v \cos \alpha}{eL} \approx 77,3 \cdot k \text{ мТл}, \text{ где } k = 1, 2, \dots$$

**5.10. Закон электромагнитной индукции.** По двум гладким медным шинам, установленным под углом  $\beta = 30^\circ$  к горизонту, скользит под действием силы тяжести медная перемычка массой  $m = 10$  г (рис. 5.7). Шины замкнуты на сопротивление  $R = 1$  Ом, расстояние между шинами  $l = 1$  м. Система находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл, перпендикулярном к плоскости, в которой перемещается перемычка. Сопротивления шин, перемычки и скользящих контактов, а также индуктивность контура пренебрежимо малы. Определите установившуюся скорость перемычки. Ответ представьте в единицах СИ.

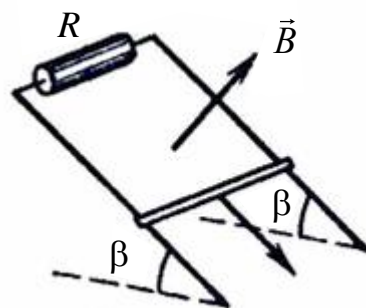


Рис. 5.7

Дано:  $\beta = 30^\circ$ ,  $m = 10$  г,  $R = 1$  Ом,  $l = 1$  м,  $B = 0,1$  Тл,  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

Определить  $v$ .

**Решение.** На концах проводника (перемычки, рис. 5.8), движущегося в магнитном поле, возникает разность потенциалов (ЭДС электромагнитной индукции), определяемая соотношением

$$U = \mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями скорости  $\vec{v}$  перемычки и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . В нашем случае  $\alpha = 90^\circ$ . Поэтому

$$\mathcal{E}_i = Blv. \quad (2)$$

ЭДС индукции создает в контуре, образованном шинами, перемычкой и сопротивлением  $R$ , индукционный ток  $I$ , который по правилу

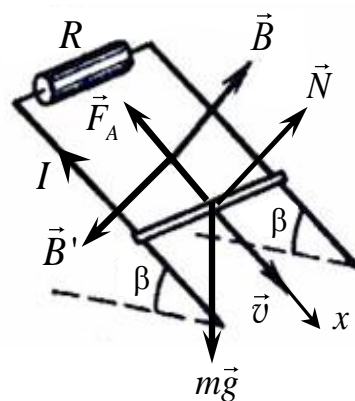


Рис. 5.8



Ленца имеет такое направление, что созданный им магнитный поток противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток. Отсюда следует, что вектор магнитной индукция  $\vec{B}'$  магнитного поля индукционного тока должен быть направлен противоположно вектору  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля. Тогда, применяя правило буравчика, находим, что индукционный ток направлен по часовой стрелке.

На переемычку (см. рис. 5.8) действуют сила тяжести  $m\vec{g}$ , сумма нормальных составляющих сил реакции шин  $\vec{N}$  и сила Ампера  $\vec{F}_A$ . Используя правило левой руки, находим, что сила Ампера  $\vec{F}_A$  направлена против скорости  $\vec{v}$  переемычки.

По второму закону Ньютона

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{N} = m\vec{a}. \quad (3)$$

Спроектируем уравнение (3) на ось  $x$

$$mg \sin\beta - F_A = ma. \quad (4)$$

Сила Ампера, действующая на проводник с током в магнитном поле, определяется формулой

$$F_A = IBl \sin\gamma, \quad (5)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике,  $l$  – длина проводника,  $\gamma$  – угол между направлениями тока и вектора магнитной индукции. В нашем случае угол  $\gamma$  равен  $90^\circ$ . Поэтому уравнение (5) принимает вид

$$F_A = IBl. \quad (6)$$

Воспользовавшись выражением (2) для ЭДС индукции, по закону Ома получим выражение для силы тока в цепи

$$I = \mathcal{E}_i / R = Blv / R. \quad (7)$$

Используя уравнения (6) – (7), представим уравнение (4) в виде

$$mg \sin\beta - B^2 l^2 v / R = ma. \quad (8)$$

Установившийся режим достигается, когда сила Ампера станет равной проекции силы тяжести на ось  $x$ . Тогда ускорение  $a$  переемычки станет равной 0 и уравнение (8) примет вид

$$mg \sin\beta - B^2 l^2 v / R = 0. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) относительно  $v$ , найдем

$$v = mgR \sin\beta / (B^2 l^2) = 5 \text{ м/с}.$$

**5.11. Энергия магнитного поля.** В катушке индуктивности сила тока равномерно увеличивается со скоростью  $\frac{dI}{dt} = 3 \frac{\text{А}}{\text{с}}$ . Определите модуль ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$ , возникающей в катушке, если энергия  $W$

магнитного поля катушки при силе тока в ней  $I = 3$  А равна 150 Дж. Ответ представьте в единицах СИ.

Дано:  $\frac{dI}{dt} = 3 \frac{\text{А}}{\text{с}}, I = 3 \text{ А}, W = 150 \text{ Дж}.$

Определить  $|\mathcal{E}_{si}|$ .

**Решение.** При изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$ , модуль которой равен:

$$|\mathcal{E}_{si}| = \left| L \frac{dI}{dt} \right|, \quad (1)$$

где  $L$  – индуктивность катушки.

Энергия  $W$  магнитного поля катушки индуктивности с током  $I$  определяется формулой

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (2)$$

Решая систему уравнений (1) – (2) относительно  $\mathcal{E}_{si}$ , найдем:

$$|\mathcal{E}_{si}| = \frac{2W}{I^2} \cdot \left| \frac{dI}{dt} \right| = 100 \text{ В}.$$

### 5.12. Ускорители заряженных частиц.

Однократно ионизованные ионы  ${}^4_2\text{He}^+$  ускоряют в циклотроне так, что максимальный радиус орбиты  $r = 60$  см. Частота генератора циклотрона  $\nu = 10,0$  МГц, ускоряющее напряжение между дуантами  $U = 50$  кВ. Пренебрегая зазором между дуантами, определите полное время  $t$  ускорения иона. Принять, что начальная кинетическая энергия иона равна нулю. Ответ представьте в микросекундах и округлите до десятых.

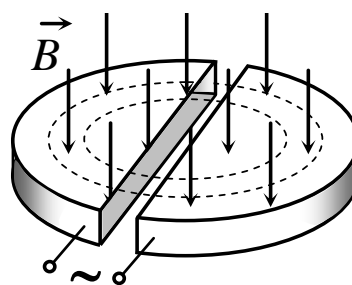


Рис. 5.9

Дано:  $r = 60$  см,  $\nu = 10,0$  МГц,  $U = 50$  кВ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m = 6,64 \cdot 10^{-27}$  кг.

Определить  $t$ .

**Решение.** Полное время  $t$  ускорения иона в циклотроне равно:

$$t = NT = N/\nu, \quad (1)$$

где  $N$  – число оборотов, совершенных ионом гелия за время  $t$  ускорения иона,  $T = 1/\nu$  – период обращения иона по окружности внутри находя-

щихся между полюсами постоянного электромагнита дуантов циклотрона,  $\nu$  – частота обращения иона, равная частоте генератора.

Частота обращения иона определяется формулой

$$\nu = \frac{v}{2\pi r}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость иона гелия на орбите радиусом  $r$ .

Ускорение частиц в циклотроне производит электрическое поле в зазоре между дуантами. В зазоре между дуантами ион гелия за один оборот дважды проходит ускоряющее электрическое поле. Кинетическая энергия иона при выходе из зазора равна работе сил ускоряющего электрического поля:

$$E_{\text{кин}} = 2eU, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд однократно ионизованного иона гелия.

Следовательно, за  $N$  оборотов ион гелия приобретает энергию:

$$mv^2/2 = NE_{\text{кин}} = 2eNU. \quad (4)$$

Из уравнения (4) найдем число оборотов  $N$ , которые необходимо совершить иону, чтобы достичь скорости  $v$ ,

$$N = \frac{mv^2}{4eU}, \quad (5)$$

Решая систему уравнений (1) – (2), (5) относительно времени  $t$  ускорения иона, найдем:

$$t = \frac{m\pi^2 r^2 \nu}{eU} \approx 29,4 \text{ мкс}.$$

**5.13\*.** Заряженный конденсатор емкостью  $C_0 = 1$  мкФ замыкают на катушку индуктивностью  $L = 1$  мГн. По какому закону  $C(t)$  должна изменяться во времени емкость конденсатора, чтобы сила тока в цепи нарастала прямо пропорционально времени? Активным сопротивлением обмотки катушки индуктивности пренебречь.

Дано:  $C_0 = 1$  мкФ,  $L = 1$  мГн,  $I = kt$ .

Определить  $C(t)$ .

**Решение.** В цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности, активное сопротивление которой равно нулю, возникает ЭДС самоиндукции  $|\mathcal{E}_{si}| = -L \frac{dI}{dt}$ , связанная с падением напряжения  $U_L$  на катушке соотношением,

$$U_L = -|\mathcal{E}_{si}| = -\left(-L \frac{dI}{dt}\right) = L \frac{dI}{dt}. \quad (1)$$

По условию задачи, сила тока в цепи изменяется по линейному закону:  $I = kt$ , где  $k$  – постоянная. Следовательно, скорость изменения тока в зависимости от времени постоянна:  $\frac{dI}{dt} = \frac{I}{t} = k$ . Поэтому падение напряжения на индуктивности  $U_L$  со временем не изменяется и уравнение (1) в любой момент времени может быть представлено в виде

$$U_L = L \frac{I}{t}. \quad (2)$$

При  $t = 0$  напряжение  $U_C$  на конденсаторе определяется формулой

$$U_C = q_0/C_0, \quad (3)$$

где  $q_0$  – начальный заряд конденсатора, а в момент времени  $t$

$$U_C = (q_0 - q)/C, \quad (4)$$

где  $q$  – заряд, ушедший с обкладок конденсатора за время  $t$ ,  $C$  – емкость конденсатора в момент времени  $t$ .

Напряжение  $U_C$  на конденсаторе равно напряжению  $U_L$  на катушке и с течением времени также не изменяется, так что

$$U_C = \frac{q_0}{C_0} = \frac{q_0 - q}{C}, \quad (5)$$

Из уравнений (2) – (3), представим зависимость  $I(t)$  силы тока от времени в виде

$$I(t) = \frac{q_0 t}{LC_0}. \quad (6)$$

Для линейной зависимости силы тока от времени, среднее значение силы тока за время  $t$  находится как полусумма начального  $I_0 = 0$  (при  $t = 0$ ) и конечного  $I(t) = \frac{q_0 t}{LC_0}$  значений силы тока:

$$I_{\text{cp}} = \frac{I_0 + I_t}{2} = \frac{q_0 t}{2LC_0}. \quad (7)$$

Следовательно, заряд  $q$ , ушедший с обкладок конденсатора за время  $t$ ,

$$q = I_{\text{cp}} t = \frac{q_0 t^2}{2LC_0}. \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение (5), приведем уравнение (5) к виду

$$\frac{q_0}{C_0} = \frac{1}{C} \left( q_0 - \frac{q_0 t^2}{2LC_0} \right). \quad (9)$$

Решая уравнение (9) относительно  $C(t)$ , найдем:

$$C(t) = C_0 \left( 1 - \frac{t^2}{2LC_0} \right) = 10^{-6} (1 - 5 \cdot 10^8 t^2).$$

**Примечание.** Выражение (8) может быть также получено интегрированием функции (6) в пределах от 0 до  $t$ .

$$q = \int_0^t Idt = \int_0^t \frac{q_0 t}{LC_0} dt = \frac{q_0 t^2}{2LC_0}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

#### 5.1.

**5.1.1.** Заряд, протекающий через поперечное сечение проводника, зависит от времени по закону  $q = 0,3t^2$ . Определите среднее значение силы тока в интервале времени от 2 до 10 с. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [3,6]

**5.1.2.** Зависимость электрического заряда, протекающего через проводник, от времени выражается уравнением  $q = 4t - t^2$ . Определите силу тока в проводнике в момент времени  $t = 2$  с. [0]

На рис. 5.10 представлена электрическая схема, содержащая сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Получите формулу для расчета результирующего сопротивления. [ $R = R_1 + R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$ ]

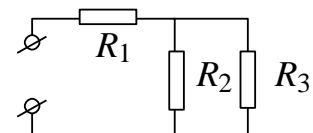


Рис. 5.10

**5.1.3.** При включении электрической лампы в сеть сила тока в первый момент (1) отличается от силы тока при работе лампы (2). В каком случае сила тока больше? Ответ обоснуйте. [1]

**5.1.4.** Как включается в сеть амперметр? Каким: малым (1) или большим (2) должно быть сопротивление амперметра? Ответ обоснуйте. [1]

**5.1.5.** Как включается в сеть вольтметр? Каким: малым (1) или большим (2) должно быть сопротивление вольтметра? Ответ обоснуйте. [2]

**5.1.6.** Увеличится (1) или уменьшится (2) напряжение на клеммах источника тока, если увеличить число подключенных к нему параллельно резисторов с одинаковым сопротивлением? Ответ обоснуйте. [2]

**5.1.7.** Какие частицы являются носителями электрического тока в вакуумном диоде: электроны (1), положительно заряженные ионы (2), отрицательно заряженные ионы (3)? Ответ обоснуйте.[1]

**5.1.8.** При каком соотношении между сопротивлением  $R$  внешней цепи и внутренним сопротивлением  $r$  источника тока мощность, выделяемая во внешней цепи, максимальна, если электрическая цепь состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений  $R$  и источника тока? Сопротивлением подводящих проводов пренебречь. Ответ обоснуйте. [ $R = r/2$ ]

**5.1.9.** Получите формулу, по которой можно вычислить количество теплоты, выделяемой во внешней цепи за время  $\Delta t$ , если электрическая цепь состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений  $R$  и источника с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ . Внутреннее сопротивление источника ЭДС принять равным нулю. [ $Q = \mathcal{E}^2 \cdot \Delta t / (2R)$ ]

**5.1.10.** В сеть параллельно включены две лампы 1 и 2. Сопротивление лампы 1 больше сопротивления лампы 2. В какой из ламп (1 или 2) выделится большее количество теплоты за равное время? Ответ обоснуйте. [2]

**5.1.11.** Преимущественно какой: электронной (1) или дырочной (2) будет проводимость четырехвалентного германия, если в него введен пятивалентный мышьяк? Ответ обоснуйте. [1]

**5.1.12.** Преимущественно какой: электронной (1) или дырочной (2) будет проводимость четырехвалентного кремния, если в него введен трехвалентный индий? Ответ обоснуйте. [2]

**5.1.13.** Магнитное поле создано двумя параллельными проводниками с токами, направленными, как показано на рис. 5.11, причем  $I_1 = I_2$ . Найдите направление результирующего вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в точке А. Ответ обоснуйте.

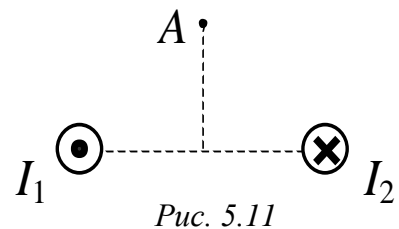
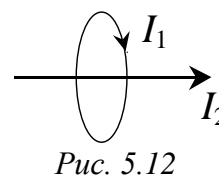


Рис. 5.11

**5.1.14.** Как взаимодействуют два параллельных друг другу проводника, если токи в них протекают в противоположных направлениях? Ответ обоснуйте.

**5.1.15.** Как взаимодействуют два параллельных друг другу проводника, если токи в них протекают в одном направлении? Ответ обоснуйте.

**5.1.16.** Прямолинейный проводник с током  $I_2$  (рис. 5.12) проходит вдоль оси кругового проводника с током  $I_1$ . С какой силой взаимодействуют токи? Ответ обоснуйте. [0]

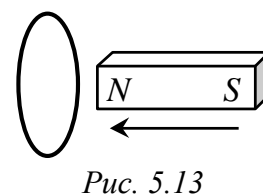


**5.1.17.** Получите выражение для модуля импульса  $p$  частицы с зарядом  $q$ , которая движется по окружности радиусом  $R$  в магнитном поле, индукция которого  $B$ . [ $p = qBR$ ]

**5.1.18.** Как изменится период обращения заряженной частицы в циклотроне при увеличении ее скорости в 8 раз? Рассмотреть нерелятивистский случай ( $v \ll c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме). Ответ обоснуйте. [Не изменится]

**5.1.19.** Магнитный поток, пронизывающий проводящую рамку с сопротивлением  $R$ , изменяется по закону  $\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \cdot \sin \omega t$ . Получите закон изменения индукционного тока от времени. [ $I = -\Phi_0 \cdot \sin(\omega t)/R$ ]

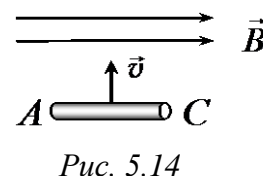
**5.1.20.** Как направлен индукционный ток, возникающий в медном кольце при приближении прямого магнита, как показано на рис. 5.13? Ответ обоснуйте. [Против часовой стрелки]



**5.1.21.** Возникнет (1) или нет (2) ЭДС в расположенном горизонтально круговом контуре, если вдоль оси этого контура будет падать заряженный шарик? Ответ обоснуйте. [2]

**5.1.22.** Под каким углом (в градусах) по отношению к вектору магнитной индукции должен двигаться прямой проводник, чтобы ЭДС индукции в нем была максимальной? Ответ обоснуйте. [90]

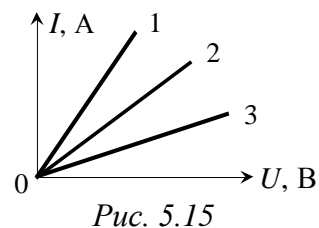
**5.1.23.** Будет ли возникать разность потенциалов на концах проводника, движущегося в магнитном поле, как показано на рис. 5.14? Ответ обоснуйте. [Не будет]



**5.1.24.** Ток через катушку с индуктивностью  $L$  изменяется по закону  $I = I_m \cos \omega t$ . Получите выражение для ЭДС самоиндукции. [ $\mathcal{E} = \omega L \cdot I_m \sin \omega t$ ]

## 5.2.

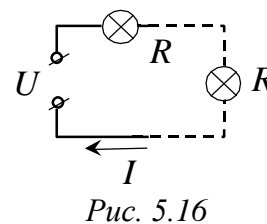
**5.2.1.** На рис. 5.15 изображены графики зависимости силы тока от приложенного напряжения для трех проводников. Какой из проводников обладает большим сопротивлением? Ответ обоснуйте. [3]



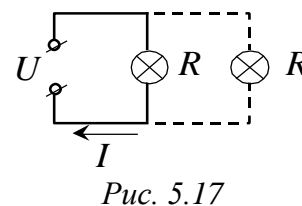
**5.2.2.** Напишите формулу, выражающую зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры, и постройте график зависимости удельного сопротивления металлического проводника от температуры (в градусах Цельсия).

**5.2.3.** Получите формулу и постройте график зависимости напряжения на клеммах источника тока от сопротивления внешней цепи, если электродвижущая сила источника  $\mathcal{E}$ , а его внутреннее сопротивление  $r$ .

**5.2.4.** Постройте графики зависимости силы постоянного тока  $I$ , протекающего по электрической цепи (рис. 5.16), от напряжения  $U$  для двух случаев: а) в цепь включена одна лампочка с сопротивлением  $R$  спирали; б) в цепь включены последовательно две лампочки с одинаковым сопротивлением  $R$  спиралей.



**5.2.5.** Постройте графики зависимости силы постоянного тока  $I$ , протекающего по электрической цепи (рис. 5.17), от напряжения  $U$  для двух случаев: а) в цепь включена одна лампочка с сопротивлением  $R$  спирали; б) в цепь включены параллельно две лампочки с одинаковым сопротивлением  $R$  спиралей.



**5.2.6.** Заряд, протекающий через поперечное сечение проводника, зависит от времени по закону  $q = 0,3t^2$ . Постройте график зависимости силы тока от времени.

**5.2.7.** Напишите формулу, выражающую зависимость мощности постоянного тока, выделяемой на участке цепи сопротивлением  $R$ , от величины силы тока  $I$ . Нарисуйте график зависимости мощности, рассеиваемой на сопротивлении  $R$  ( $R = \text{const}$ ), от силы тока в цепи.



**5.2.8.** Напишите формулу, по которой можно определить количество теплоты  $Q$ , выделяемой в проводнике сопротивлением  $R$  в течение времени  $t$ , если к проводнику приложено напряжение  $U$ . Нарисуйте график зависимости мощности, выделяемой на сопротивлении  $R$ , от сопротивления проводника.

**5.2.9.** На рис. 5.18 приведен график зависимости количества теплоты, выделяемой в резисторе, от времени при протекании по нему постоянного тока. Сопротивление резистора 5 Ом. Чему равна сила тока в резисторе? Ответ представьте в единицах СИ. [2]

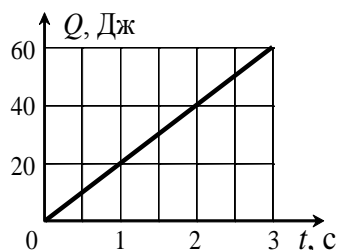


Рис. 5.18

**5.2.10.** На рис. 5.19 изображены графики зависимости мощности, рассеиваемой на трех различных резисторах, в зависимости от силы протекающего через них тока. Какой из этих резисторов (1, 2 или 3) имеет наименьшее сопротивление? Ответ обоснуйте. [3]

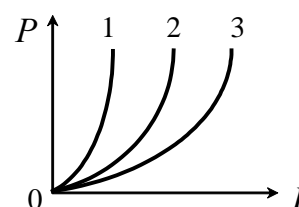


Рис. 5.19

**5.2.11.** На рис. 5.20 представлен график зависимости массы меди, выделившейся на катоде, от времени протекания через электролит тока силой 370 мА. Определите электрохимический эквивалент меди. Ответ представьте в мг/Кл и округлите до сотых. [0,03]

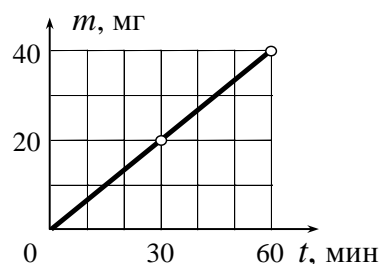


Рис. 5.20

**5.2.12.** Нарисуйте и объясните ход вольтамперной характеристики p-n – перехода.

**5.2.13.** Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле так, что угол  $\alpha$  между векторами скорости частицы и магнитной индукции поля равен  $90^\circ$ . Чему должен быть равен этот угол (в градусах), чтобы сила Лоренца, действующая на заряженную частицу, уменьшилась в два раза? Постройте график зависимости силы Лоренца от величины угла  $\alpha$  ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ). [30]

**5.2.14.** Напишите формулу силы Лоренца. Нарисуйте график изменения модуля скорости заряженной частицы в зависимости от времени действия силы Лоренца.

**5.2.15.** Напишите формулу силы Лоренца. Нарисуйте график изменения кинетической энергии заряженной частицы в зависимости от времени действия силы Лоренца.

**5.2.16.** Напишите формулу силы Лоренца. Нарисуйте график изменения модуля импульса заряженной частицы от времени.

**5.2.17.** Прямоугольная рамка площадью  $S$  расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  так, что положительная нормаль к ее плоскости образует угол  $\alpha$  с направлением вектора магнитной индукции. Напишите формулу для магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, и постройте график зависимости модуля магнитного потока от величины угла  $\alpha$  ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ).

**5.2.18.** Виток радиусом  $R$  расположен в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  так, что положительная нормаль к ее плоскости перпендикулярна вектору магнитной индукции. Напишите формулу для магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, и постройте график зависимости модуля магнитного потока от радиуса витка.

**5.2.19.** Напишите формулу, выражающую закон электромагнитной индукции. Постройте график зависимости модуля ЭДС электромагнитной индукции от модуля скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.

**5.2.20.** Магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, изменяется по закону  $\Phi = kt^2$ , где  $k$  – постоянная. Получите выражение для ЭДС электромагнитной индукции и постройте график зависимости модуля ЭДС электромагнитной индукции от времени.

**5.2.21.** ЭДС индукции, возникающая в рамке сопротивлением 1 Ом при ее вращении в магнитном поле, изменяется по закону  $\mathcal{E} = 10 \cdot \sin \pi t$ . Получите выражение для индукционного тока в рамке и постройте график зависимости индукционного тока от времени.

**5.2.22.** Напишите формулу, выражающую ЭДС самоиндукции. Нарисуйте график зависимости модуля ЭДС самоиндукции от модуля скорости изменения силы тока в контуре. Индуктивность контура постоянна.

**5.2.23.** Получите выражение для ЭДС самоиндукции, если ток в замкнутом контуре индуктивностью  $L$  изменяется по закону  $i = kt^3$ , где

$k$  – постоянная, и постройте график зависимости модуля ЭДС самоиндукции от времени.

**5.2.24.** Сила тока в катушке индуктивностью  $L$  нарастает прямо пропорционально времени. Получите выражение для энергии магнитного поля катушки и постройте график зависимости энергии магнитного поля от времени.

**5.2.25.** Напишите формулу для энергии магнитного поля контура с током. Постройте график зависимости энергии магнитного поля контура с током от квадрата силы тока в нем. Индуктивность контура постоянна.

### 5.3.

**5.3.1.** В сеть с напряжением 220 В включены последовательно две лампочки на напряжение 110 В каждая. В процессе эксплуатации одна лампочка перегорела. Какой ток будет протекать через оставшуюся лампочку? Ответ обоснуйте.

**5.3.2.** В какой из приведенных схем, рис. 5.21, (1 или 2) ток через амперметр больше при одном и том же значении ЭДС? Ответ обоснуйте. [2]

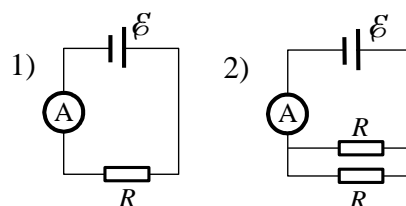


Рис. 5.21

**5.3.3.** Найдите общее сопротивление участка цепи, состоящего из трех одинаковых сопротивлений  $3R$  каждое, соединенных, как показано на схеме (рис. 5.22). Ответ обоснуйте. [R]

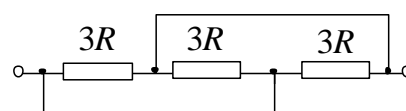


Рис. 5.22

**5.3.4.** Найдите общее сопротивление участка цепи между клеммами АВ (рис. 5.23), состоящего из пяти одинаковых сопротивлений  $R$  каждое, соединенных, как показано на схеме. Ответ обоснуйте. [R]

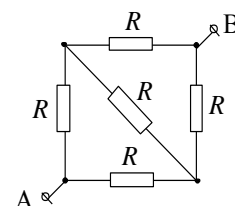


Рис. 5.23

**5.3.5.** При каком соотношении между внутренним сопротивлением  $r$  источника тока и внешним сопротивлением  $R$  сила тока через внешнее сопротивление будет одинаковой при последовательном и параллельном соединениях  $n$  одинаковых гальванических элементов? Ответ обоснуйте. [ $r = R$ ]

**5.3.6.** Два элемента с одинаковыми ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$  соединяются последовательно и замыкаются на внешнее сопротивление  $R$ . Найдите величину внешнего сопротивления  $R$ , при которой разность потенциалов  $U_1$  на полюсах первого элемента равна нулю. [ $r_1 - r_2$ ]

**5.3.7.** Замкнутая цепь состоит из  $n$  последовательно соединенных одинаковых элементов с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренними сопротивлениями  $r$ . Что покажет идеальный вольтметр, подсоединенный к зажимам одного из элементов, если сопротивление соединительных проводов можно принять равным нулю? Ответ обоснуйте. [0]

**5.3.8.** Электрический чайник имеет две спирали. При каком соединении спиралей: последовательном (1) или параллельном (2) вода в чайнике закипит быстрее? Ответ обоснуйте. [2]

**5.3.9.** В двух электролитических ваннах, которые соединены последовательно, подвергаются электролизу растворы  $\text{FeCl}_2$  и  $\text{FeCl}_3$ . Одинаково ли количество выделившегося в ваннах железа? Валентность железа в соединении  $\text{FeCl}_2 - 2$ , в  $\text{FeCl}_3 - 3$ . Ответ обоснуйте. [Не одинаково]

**5.3.10.** На рис. 5.24 показаны направления токов через  $p-n$  – переход. В каком случае (1) или (2) сопротивление  $p-n$  – перехода больше? Ответ обоснуйте. [1]

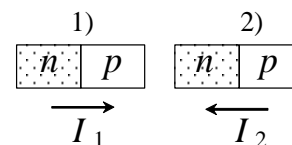


Рис. 5.24

**5.3.11.** Нарисуйте схему прямого включения  $p-n-p$  транзистора в электрическую цепь. Величина какого тока: эмиттера  $I_э$  или коллектора  $I_к$  больше при прямом включении  $p-n-p$  транзистора? Ответ обоснуйте. [Примерно равны]

**5.3.12.** Проволочный квадрат с током находится в однородном магнитном поле. Плоскость квадрата перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определите угол между силами Ампера, действующими на противоположные стороны квадрата. Ответ представьте в градусах. [180]

**5.3.13.** Нейтрон и протон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции на расстоянии  $L$  друг от друга с одинаковыми скоростями. Найдите отношение модулей сил, действующих на них со стороны магнитного поля в этот момент времени. Ответ обоснуйте. [0]

**5.3.14.** Вблизи бесконечного прямолинейного проводника с током подвешена на нити легкая прямоугольная рамка (рис. 5.25). Что произойдет с рамкой, если по ней пропустить ток в указанном на рисунке направлении? Ответ обоснуйте.

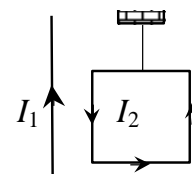


Рис. 5.25

**5.3.15.** В каком направлении (1, 2, 3 или 4) действует сила Ампера на проводник с током  $I$ , помещенный в магнитное поле постоянного магнита (рис. 5.26)? Ответ обоснуйте. [4]

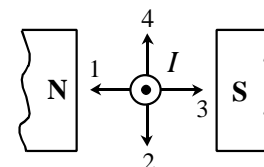


Рис. 5.26

**5.3.16.** Укажите направление силы Лоренца, действующей на электрон (рис. 5.27). Ответ обоснуйте.

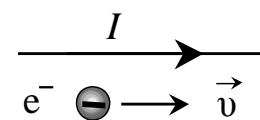


Рис. 5.27

**5.3.17.** По какой траектории будет двигаться заряженная частица, если угол между направлением вектора магнитной индукции и вектором ее скорости равен нулю? Ответ обоснуйте. [Прямая]

**5.3.18.** В магнитное поле  $\vec{B}$  влетает электрон со скоростью  $\vec{v}$  и движется по дуге 1 окружности (рис. 5.28). По какой траектории (1, 2, 3 или 4) будет двигаться позитрон, влетев в это поле с такой же скоростью? Ответ обоснуйте. [4]

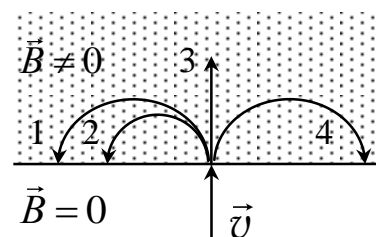


Рис. 5.28

**5.3.19.** Протон влетает в однородное магнитное поле индукцией 4 мТл со скоростью  $5 \cdot 10^5$  м/с перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ . Какую работу совершает поле над протоном за один полный оборот по окружности? Ответ обоснуйте. [0]

**5.3.20.** По какой траектории движутся заряженные частицы в циклотроне? Ответ обоснуйте.

**5.3.21.** Может ли магнитный поток через поверхность быть отрицательным? Ответ обоснуйте. [Может]

**5.3.22.** Будет ли возникать индукционный ток в рамке, находящейся в однородном магнитном поле, если ее перемещать поступательно, как показано на рис. 5.29? Ответ обоснуйте. [Не будет]

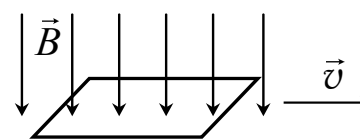


Рис. 5.29

**5.3.23.** Укажите направление (1 или 2) индукционного тока в контуре, показанном на рис. 5.30. Ответ обоснуйте. [2]

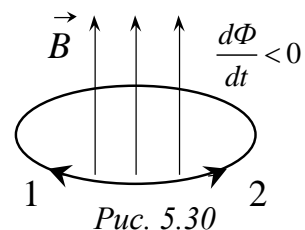


Рис. 5.30

**5.3.24.** Проволочная рамка вращается в однородном магнитном поле вокруг оси  $Oy$ , параллельной вектору магнитной индукции однородного магнитного поля  $\vec{B}$  (рис. 5.31). Будет ли в ней возникать индукционный ток? Ответ обоснуйте. [Не будет]

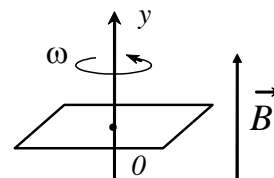


Рис. 5.31

**5.3.25.** Два круговых проводника А и В расположены перпендикулярно друг к другу, как показано на рис. 5.32. Будет ли возникать ток в проводнике А при изменениях тока в контуре В? Ответ обоснуйте. [Не будет]

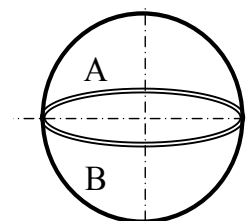


Рис. 5.32

## 5.4.

**5.4.1.** Сколько электронов проходит через поперечное сечение контактного провода трамвая за 1,6 с при силе тока  $10^3$  А? [ $1 \cdot 10^{22}$ ]

**5.4.2.** К концам стального проводника длиной 20 м приложено напряжение 3,6 В. Найдите среднюю скорость упорядоченного движения носителей зарядов в проводнике, если их концентрация  $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^4$  и округлите до десятых. [2,3]

**5.4.3.** Определите разность потенциалов на концах проводника сопротивлением 5 Ом, если за минуту через его поперечное сечение пройдет заряд  $2,88 \cdot 10^3$  Кл. Ответ представьте в единицах СИ. [240]

**5.4.4.** Каким должно быть сопротивление шунта, используемого для увеличения предела измерения амперметра сопротивлением 1,2 Ом с 2 А до 50 А? Ответ представьте в единицах СИ. [0,05]

**5.4.5.** Имеется предназначенный для измерения разности потенциалов до 30 В вольтметр, сопротивление которого 2 кОм. Каким должно быть добавочное сопротивление, чтобы этим вольтметром можно было измерить напряжение до 75 В? Ответ представьте в единицах СИ. [3000]

**5.4.6.** К полюсам источника тока с ЭДС 8 В присоединили проводник сопротивлением 30 Ом. При этом напряжение между концами проводника 6 В. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока? Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**5.4.7.** Какое количество теплоты выделится в реостате, сопротивление которого 6 Ом, если за время 10 мин через него прошел электрический заряд 600 Кл? Ответ представьте в килоджоулях. [3,6]

**5.4.8.** С каким КПД работает свинцовый аккумулятор, ЭДС которого 2,15 В, сопротивление внешней цепи 0,25 Ом, сила тока в цепи 5 А? Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [58]

**5.4.9.** Элемент с ЭДС 2 В имеет внутреннее сопротивление 0,5 Ом. Найдите величину внешнего сопротивления, если сила тока в цепи 0,25 А. Ответ представьте в единицах СИ. [7,5]

**5.4.10.** Генератор тока с внутренним сопротивлением 0,5 Ом питает 50 соединенных параллельно ламп, сопротивлением 100 Ом каждая, и напряжением на них 220 В. Найдите ЭДС генератора (сопротивлением подводющих проводов пренебречь). Ответ представьте в единицах СИ. [275]

**5.4.11.** При коротком замыкании источника с ЭДС 1,8 В сила тока в цепи 6 А. При каком сопротивлении внешней цепи сила тока в ней будет 2А? Ответ представьте в единицах СИ. [0,6]

**5.4.12.** Аккумулятор с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 1 Ом питает внешнюю цепь из двух резисторов сопротивлением по 10 Ом, соединенных параллельно. Определите количество теплоты, которое выделится во внешней цепи за 15 минут. Ответ представьте в единицах СИ. [4500]

**5.4.13.** При ремонте электроплитки ее спираль уменьшили на 0,1 ее первоначальной длины. Во сколько раз при этом увеличилась мощность электроплитки? Ответ округлите до десятых. [1,1]

**5.4.14.** Прямолинейный проводник, по которому течет постоянный ток, расположен в однородном магнитном поле так, что направление тока в проводнике составляет угол  $30^\circ$  с направлением вектора магнитной индукции. Как изменится сила Ампера, действующая на проводник, если его расположить под углом  $60^\circ$  к направлению линий магнитной индукции? Ответ округлите до сотых. [1,73]

**5.4.15.** При силе тока через электролит 1 А на катоде выделилось 8,05 г вещества. Определите электрохимический эквивалент вещества, если ток через раствор протекал в течение 2 ч. Ответ получите в единицах СИ, умножьте на  $10^7$  и округлите до целого числа. [11]

**5.4.16.** Электрон движется по окружности радиусом 2 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,02 Тл. Найдите импульс электрона. Ответ получите в единицах СИ, умножьте на  $10^{23}$  и округлите до десятых. [6,4]

**5.4.17.** Определите индукцию магнитного поля, если на прямоугольную рамку с током, состоящую из 100 витков, действует максимальный вращающий момент  $3 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Размер рамки  $20 \times 30$  мм<sup>2</sup>, сила тока в ней 5 А. Ответ представьте в единицах СИ. [0,01]

**5.4.18.** Максимальный магнитный поток через контур, площадь поперечного сечения которого 60 см<sup>2</sup>, равен 0,3 мВб. Определите индукцию магнитного поля внутри контура. Поле считать однородным. Ответ представьте в единицах СИ. [0,05]

**5.4.19.** Магнитный поток 40 мВб пронизывает контур. Определите среднее значение ЭДС индукции, которая возникает в контуре, если магнитный поток равномерно изменяется до нуля за время  $2 \cdot 10^{-3}$  с. Ответ представьте в единицах СИ. [20]

**5.4.20.** Чему равна ЭДС индукции, возбуждаемая в контуре, если скорость изменения магнитного потока, пронизывающего контур, равна 0,03 Вб/с? Ответ представьте в единицах СИ. [0,03]

**5.4.21.** Магнитный поток, пронизывающий контур сопротивлением 1 Ом, за время 0,01 с равномерно убывает от 0,5 до 0,4 Вб. Найдите величину индукционного тока. Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**5.4.22.** За время 0,1 с магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, равномерно уменьшился до 1,5 Вб. При этом в нем возникла ЭДС индукции, равная 15 В. Определите первоначальную величину магнитного потока. Ответ представьте в единицах СИ. [3]

**5.4.23.** При равномерном возрастании индукции магнитного поля, перпендикулярного поперечному сечению проволочной катушки площадью 10 см<sup>2</sup>, от 0 до 0,2 Тл за 0,001 с на ее концах возникло напряжение 100 В. Сколько витков имеет катушка? [500]



**5.4.24.** Если сила тока, протекающего в соленоиде, изменяется на 50 А в секунду, то на концах соленоида возникает среднее значение ЭДС самоиндукции, равное 0,08 В. Определите индуктивность соленоида. Ответ представьте в миллигенри и округлите до десятых. [1,6]

**5.4.25.** Найдите энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 0,5 Вб. Ответ представьте в единицах СИ. [2,5]

## 5.5.

**5.5.1.** Сила анодного тока в проводнике 10 А. Найдите массу электронов, прошедших через поперечное сечение проводника за 1 час? Ответ представьте в миллиграммах и округлите до десятых. [0,2]

**5.5.2.** Определите плотность тока, если за 0,4 с через проводник сечением 1,2 мм<sup>2</sup> прошло  $6 \cdot 10^{18}$  электронов. Ответ представьте в мегаамперах на квадратный метр. [2]

**5.5.3.** К никелевому проводу сечением 0,51 мм<sup>2</sup> и массой 880 г подведено напряжение 0,73 мВ. Найдите плотность тока в проводе. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [51]

**5.5.4.** При какой температуре сопротивление вольфрамового проводника станет в два раза больше, чем при 0 °С? Ответ представьте в градусах Цельсия. [273]

**5.5.5.** В электрической цепи, приведенной на рис. 5.33, идеальный амперметр показывает ток 1 А. Если замкнуть ключ *K*, то ток возрастает до 2 А. Чему равна ЭДС источника? Ответ представьте в единицах СИ. [20]

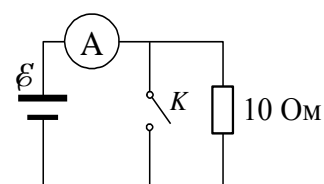


Рис. 5.33

**5.5.6.** В качестве вольтметра используется гальванометр с внутренним сопротивлением 500 Ом, стрелка которого отклоняется на всю шкалу, когда через него течет ток 2 мА. Какое максимальное напряжение можно измерить данным вольтметром, если в нем последовательно с гальванометром включено добавочное сопротивление 74,5 кОм? Ответ представьте в единицах СИ. [150]

- 5.5.7.** На сколько равных частей надо разрезать проводник, чтобы при параллельном соединении этих частей получить сопротивление в 25 раз меньшее, чем сопротивление всего проводника? [5]
- 5.5.8.** При подключении электромагнита к источнику тока, ЭДС которого 30 В и внутреннее сопротивление 2 Ом, напряжение на зажимах источника равно 28 В. Найдите силу тока в цепи. Ответ представьте в единицах СИ. [1]
- 5.5.9.** Шесть гальванических элементов с ЭДС 1,6 В и внутренним сопротивлением 0,48 Ом каждый соединены параллельно в батарею и замкнуты на внешнее сопротивление 2 Ом. Определите силу тока во внешней цепи. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,77]
- 5.5.10.** К источнику тока, ЭДС которого 1 В, подключен резистор сопротивлением 1 Ом. Определите работу сторонних сил за время 20 с, если сила тока в цепи 0,8 А. Ответ представьте в единицах СИ. [16]
- 5.5.11.** На резисторе сопротивлением 9 Ом, подключенном к источнику тока с ЭДС 3,1 В, выделяется мощность 1 Вт. Определите внутреннее сопротивление источника тока. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,3]
- 5.5.12.** Две электрические лампочки сопротивлениями 360 Ом и 240 Ом включены в сеть первый раз последовательно, второй раз параллельно. Во сколько раз мощность, поглощаемая лампочками при параллельном соединении, больше, чем при последовательном? Ответ округлите до сотых. [4,17]
- 5.5.13.** Электромотор рулевой машинки автопилота самолета рассчитан на 27 В и потребляет мощность 1620 Вт. Определите минимальную площадь сечения подводящих проводов, если допустимая плотность тока в них 6 А/мм<sup>2</sup>. Ответ представьте в квадратных миллиметрах. [10]
- 5.5.14.** Сопротивление лампочки накаливания в рабочем состоянии 352 Ом. Напряжение в сети 220 В. Сколько лампочек включено параллельно в сеть, если мощность, потребляемая лампочками, равна 2,2 кВт? [16]
- 5.5.15.** На сколько отличаются наибольшее и наименьшее значения модуля силы, действующей на прямой провод длиной 40 см с током 20 А, при различных положениях провода в однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,5 Тл? Ответ представьте в единицах СИ. [4]

**5.5.16.** Какая работа совершается при перемещении проводника длиной 0,2 м, по которому течет ток 5 А, на расстояние 3 м в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл, если проводник расположен под углом  $30^\circ$  к направлению поля? Ответ представьте в единицах СИ. [3]

**5.5.17.** Свободно перемещающийся по рамке проводник с током через изолятор прикреплен к пружине жесткостью 5 Н/м (рис. 5.34). Длина проводника 0,5 м и по нему протекает ток силой 2 А. При включении магнитного поля, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости рамки, пружина растянулась на 10 см. Определите величину индукции магнитного поля. Ответ представьте в миллитеслах. [500]

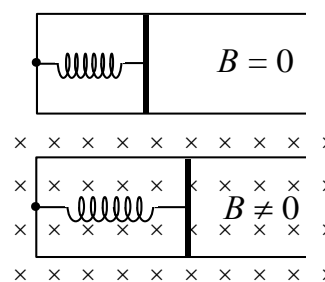


Рис. 5.34

**5.5.18.** Электрон движется по окружности радиусом 2 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,02 Тл. Найдите кинетическую энергию электрона. Ответ представьте в килоэлектронвольтах и округлите до целого числа. [14]

**5.5.19.** Линии индукции однородного магнитного поля с индукцией 8 Тл пронизывают рамку под углом  $30^\circ$  к ее плоскости, создавая магнитный поток 2 Вб. Чему равна площадь рамки? Ответ представьте в единицах СИ. [0,5]

**5.5.20.** Квадратная рамка со стороной 5 см, имеющая 10 витков, находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Плоскость рамки параллельна направлению вектора индукции магнитного поля. Определите вращающий момент сил, действующих на рамку, если ток в рамке равен 4 А. Ответ представьте в единицах СИ. [0,01]

**5.5.21.** Скорость изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, равна 10 Вб/с. Определите заряд на конденсаторе емкостью 1 мкФ, который включен в этот контур. Ответ представьте в единицах СИ. [ $10^{-5}$ ]

**5.5.22.** В катушке, индуктивность которой 0,03 мГн, при выключении тока, начальное значение которого 0,6 А, возникает ЭДС самоиндукции, среднее значение которой 0,15 В. В течение какого времени ток уменьшался до нуля? Ответ представьте в микросекундах. [120]

**5.5.23.** Сверхпроводящее кольцо площадью  $100 \text{ см}^2$  и индуктивностью  $5 \text{ мГн}$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $1 \text{ Тл}$ . Плоскость кольца параллельна вектору  $\vec{B}$ , и ток в кольце равен нулю. Затем кольцо повернули на  $90^\circ$  в положение, перпендикулярное к полю. Найдите ток в кольце после поворота. Ответ представьте в единицах СИ. [2]

**5.5.24.** Квадратная рамка со стороной  $6 \text{ см}$  помещена в однородное магнитное поле, индукция которого за  $0,03 \text{ с}$  изменилась от  $0,05 \text{ Тл}$  до  $0,2 \text{ Тл}$ . Угол между нормалью к плоскости рамки и линиями индукции равен  $60^\circ$ . Определите ЭДС индукции в рамке. Ответ представьте в милливольтгах. [9]

**5.5.25.** На какую величину изменится энергия магнитного поля катушки индуктивностью  $0,2 \text{ Гн}$  при изменении силы тока от  $5$  до  $10 \text{ А}$ ? Ответ представьте в единицах СИ. [7,5]

## 5.6.

**5.6.1.** Определите температурный коэффициент сопротивления реостата, сопротивление которого при  $20^\circ \text{С}$  равно  $20 \text{ Ом}$ , а при температуре  $100^\circ \text{С}$  –  $28 \text{ Ом}$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до тысячных. [0,006]

**5.6.2.** К гальванометру сопротивлением  $290 \text{ Ом}$  подключен шунт, повышающий предел измерения гальванометра в  $10$  раз. Какое сопротивление надо подключить последовательно с гальванометром с шунтом, чтобы его общее сопротивление осталось прежним? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [261]

**5.6.3.** Аккумулятор с ЭДС  $1,45 \text{ В}$  в проводнике сопротивлением  $2,5 \text{ Ом}$  создает силу тока  $0,5 \text{ А}$ . Определите силу тока при коротком замыкании аккумулятора. Ответ представьте в единицах СИ. [3,625]

**5.6.4.** Шесть аккумуляторов с внутренним сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$  каждый соединены последовательно в батарею. К этой батарее подключена лампочка сопротивлением  $11,4 \text{ Ом}$ , через которую течет ток  $2 \text{ А}$ . Определите ЭДС одного аккумулятора. Ответ представьте в единицах СИ. [4]

**5.6.5.** За время  $40 \text{ с}$  в цепи, состоящей из трех одинаковых проводников, соединенных параллельно, подключенных к идеальному источнику

постоянного тока, выделилось некоторое количество теплоты. За какое время выделится такое же количество теплоты, если проводники соединить последовательно? Ответ представьте в единицах СИ. [360]

**5.6.6.** На сколько увеличится температура медного провода, если по нему в течение 0,5 с пропускать ток плотностью  $9 \text{ А/мм}^2$ , причем 25 % тепловой энергии отдается окружающей среде? Удельное сопротивление меди считать постоянным. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,15]

**5.6.7.** Два одинаковых гальванических элемента с внутренними сопротивлениями  $0,2 \text{ Ом}$  соединены параллельно и нагружены на внешнее сопротивление  $R$ . Если эти элементы соединить последовательно, мощность, выделяющаяся на сопротивлении нагрузки, возрастает в 2,25 раза. Чему равно сопротивление  $R$  нагрузки? Ответ представьте в единицах СИ. [0,8]

**5.6.8.** Линия электропередачи имеет сопротивление  $250 \text{ Ом}$ . Какое напряжение должен иметь генератор, если его мощность  $25 \text{ кВт}$ , а потери мощности в линии не должны превышать 4 % мощности генератора? Ответ представьте в киловольтах. [12,5]

**5.6.9.** Троллейбус массой  $11 \text{ т}$  движется равномерно со скоростью  $36 \text{ км/ч}$ . Определите силу тока в обмотке двигателя, если напряжение, приложенное к обмотке,  $550 \text{ В}$  и КПД двигателя 80 %. Коэффициент сопротивления движению  $0,02$ . Ответ представьте в единицах СИ. [50]

**5.6.10.** К аккумулятору с внутренним сопротивлением  $2 \text{ Ом}$  подключили нагрузку с сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ . Затем параллельно с первым потребителем подключили второй такой же. Найдите отношение мощности, потребляемой во втором случае, к мощности, потребляемой в первом случае. Ответ округлите до сотых. [1,47]

**5.6.11.** Аэростат объемом  $250 \text{ м}^3$  наполняется водородом при температуре  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Какое количество электричества необходимо пропустить через слабый раствор серной кислоты, чтобы получить нужное количество водорода? Аэростат объемом  $250 \text{ м}^3$  наполняется водородом при температуре  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Какое количество электричества необходимо пропустить через слабый раствор серной кислоты, чтобы получить нужное количество водорода? Электрохимический эквивалент водорода принять равным  $1,044 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}$ . Ответ представьте в гигакулонах и округлите до целого числа. [4]

**5.6.12.** Никелирование металлического изделия площадью  $120 \text{ см}^2$  продолжалось 5 ч при силе тока 0,9 А. Определите толщину слоя никеля на изделии. Ответ представьте в микрометрах и округлите до целого числа. Валентность никеля принять равной 2. [47]

**5.6.13.** По прямому горизонтальному проводнику сечением  $0,2 \text{ мм}^2$  течет ток 10 А. Проводник находится в магнитном поле с индукцией 1 мТл. Силовые линии магнитного поля имеют такое направление, что сила Ампера уравнивает силу тяжести. Определите плотность вещества, из которого изготовлен проводник. Ответ представьте в единицах СИ. [5000]

**5.6.14.** Проволочная рамка (рис. 5.35) в виде равнобедренного треугольника со сторонами  $a = 5 \text{ см}$  и основанием  $b = 6 \text{ см}$  находится в магнитном поле в плоскости чертежа. Какая сила тока протекает по рамке, если при индукции 2 Тл на рамку действует вращающий момент  $2,4 \text{ мН}\cdot\text{м}$ ? Ответ представьте в единицах СИ. [1]

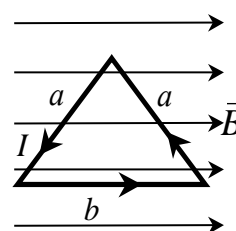


Рис. 5.35

**5.6.15.** Протон, ускоренный разностью потенциалов 0,5 кВ, влетая в однородное магнитное поле с индукцией 2 мТл, движется по окружности. Определите радиус этой окружности. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,6]

**5.6.16.** Две заряженные частицы, заряды которых равны, а масса первой в 4 раза больше массы второй, в однородном магнитном поле вращаются по окружности одного и того же радиуса. Во сколько раз кинетическая энергия второй частицы больше, чем первой? [4]

**5.6.17.** В некоторой области пространства созданы постоянное магнитное и электрическое поля ( $B = 0,3 \text{ Тл}$ ,  $E = 300 \text{ кВ/м}$ ). Перпендикулярно обоим полям движется протон, не отклоняясь от прямолинейной траектории. Найдите скорость его движения. Ответ представьте в мегаметрах за секунду. [1]

**5.6.18.** В однородном магнитном поле с частотой 35 Гц вращается прямоугольная рамка. Ось вращения рамки перпендикулярна линиям индукции магнитного поля. Максимальная индуцируемая в рамке ЭДС равна 7 В. Определите максимальный магнитный поток, пронизывающий рамку. Ответ представьте в милливеберах и округлите до целого числа. [32]

**5.6.19.** Определите амплитуду ЭДС индукции, наводимой в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, если частота вращения 50 об/с, площадь рамки  $100 \text{ см}^2$  и магнитная индукция 0,2 Тл. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,63]

**5.6.20.** Замкнутый проводник сопротивлением 3 Ом находится в магнитном поле. В результате изменения этого поля магнитный поток, пронизывающий контур, равномерно уменьшается от 0,005 Вб до 0,002 Вб. Какой заряд (в милликулонах) прошел через поперечное сечение проводника? [1]

**5.6.21.** Проволочное кольцо радиусом 0,1 м лежит на столе. Какой величины заряд протечет по кольцу, если его повернуть с одной стороны на другую? Сопротивление кольца 1 Ом, вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. Ответ представьте в микрокулонах. [3,14]

**5.6.22.** По катушке сопротивлением 5 Ом и индуктивностью 50 мГн протекает ток силой 17 А. Каким будет напряжение на концах катушки, если сила тока начнет возрастать со скоростью 100 А/с? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [85,1]

**5.6.23.** В катушке сила тока равномерно увеличивается со скоростью 2 А/с. При этом в ней возникает ЭДС самоиндукции 20 В. Какова энергия магнитного поля катушки при силе тока в ней 5 А? Ответ представьте в единицах СИ. [125]

**5.6.24.** При равномерном уменьшении тока в проволочной катушке от 12 А до 8 А за 2 с в ней возникает ЭДС самоиндукции, равная 0,8 В. Определите энергию магнитного поля в этой катушке при токе 3 А. Ответ представьте в единицах СИ. [1,8]

**5.6.25.** При увеличении силы тока, проходящего через катушку, в 2 раза энергия магнитного поля возросла на 3 Дж. Найдите начальное значение энергии поля. Ответ представьте в единицах СИ. [1]

## 5.7.

**5.7.1.** Пластины плоского конденсатора присоединены к батарее, напряжение которой 600 В. Какой величины ток будет протекать по проводам при перемещении одной пластины вдоль другой, если скорость движения 6 см/с? Пластины конденсатора имеют форму квадрата

площадью  $100 \text{ см}^2$ , расстояние между пластинами, равное  $0,1 \text{ см}$ , остается во время движения постоянным. Ответ представьте в наноамперах и округлите до целого числа. [32]

**5.7.2.** Определите суммарный импульс электронов в прямом проводе длиной  $100 \text{ м}$ , по которому течет ток силой  $70 \text{ А}$ . Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^8$  и округлите до целого числа. [4]

**5.7.3.** Электроэнергия передается по проводам, общее сопротивление которых  $400 \text{ Ом}$ . Потери напряжения составляют  $0,05$  от ЭДС генератора. Определите сопротивление нагрузки, если внутреннее сопротивление генератора  $100 \text{ Ом}$ . Ответ представьте в килоомах. [9,5]

**5.7.4.** При замыкании элемента на сопротивление  $2,3 \text{ Ом}$  сила тока в цепи  $0,56 \text{ А}$ , а при замыкании на сопротивление  $1,8 \text{ Ом}$  сила тока в цепи  $0,7 \text{ А}$ . Определите силу тока короткого замыкания. Ответ представьте в единицах СИ. [7]

**5.7.5.** Сколько одинаковых элементов с внутренним сопротивлением  $0,5 \text{ Ом}$  и ЭДС  $1,5 \text{ В}$  каждый надо соединить последовательно, чтобы напряжение на зажимах батареи было равно  $80 \text{ В}$  при силе тока  $0,5 \text{ А}$ ? [64]

**5.7.6.** В конце зарядки аккумулятора током  $2 \text{ А}$  присоединенный к нему вольтметр показывал напряжение  $12 \text{ В}$ . При разрядке того же аккумулятора током  $0,5 \text{ А}$  вольтметр показывал напряжение  $8 \text{ В}$ . Определите внутреннее сопротивление аккумулятора, пренебрегая током, протекающим по вольтметру. Ответ представьте в единицах СИ. [1,6]

**5.7.7.** Какова должна быть ЭДС батареи в схеме, приведенной на рис. 5.36, чтобы напряженность поля в плоском конденсаторе  $C$  была равна  $2 \text{ кВ/м}$ , если расстояние между пластинами конденсатора  $5 \text{ мм}$ , а  $R_1 = R_2 = r$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС? Ответ представьте в единицах СИ. [30]

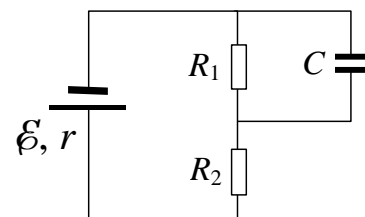


Рис. 5.36

**5.7.8.** Конденсатор емкостью  $100 \text{ мкФ}$  заряжают постоянным током через резистор сопротивлением  $100 \text{ Ом}$ . Через какое время после начала зарядки конденсатора энергия, запасенная в конденсаторе, станет равной энергии, выделенной на резисторе? Ответ представьте в единицах СИ. [0,02]



**5.7.9.** Конденсатор, подключенный к источнику тока проводами сопротивлением  $100\ \text{Ом}$ , имеет первоначальную емкость  $2\ \text{мкФ}$ . Затем его емкость за некоторое время равномерно увеличивают в  $5$  раз. При этом в подводящих проводах выделяется в виде тепла  $2,56\ \text{мДж}$  энергии. Сколько времени длилось увеличение емкости конденсатора? Напряжение на конденсаторе считать постоянным и равным  $2\ \text{кВ}$ . Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**5.7.10.** Одни и те же элементы соединены в электрическую цепь сначала по схеме 1, затем по схеме 2 (рис. 5.37). Сопротивление резистора равно  $R$ , сопротивление амперметра  $0,1R$ , сопротивление вольтметра  $9R$ . Каковы показания вольтметра в первой схеме, если во второй они равны  $100\ \text{В}$ ? Внутренним сопротивлением источника тока и сопротивлением проводов пренебречь. Ответ представьте в единицах СИ. [90]

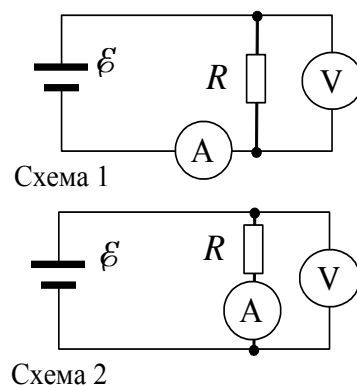


Рис. 5.37

**5.7.11.** Аккумулятор с ЭДС  $100\ \text{В}$  подключен через резистор к конденсатору переменной емкости, расстояние между пластинами которого можно изменять (рис. 5.38). Медленно раздвинув пластины, емкость конденсатора изменили на  $0,01\ \text{мкФ}$ . При этом против сил притяжения совершена работа  $80\ \text{мкДж}$ . Какое количество теплоты выделилось в электрической цепи с момента начала движения пластин до полного затухания возникших при этом переходных процессов? Ответ представьте в микроджоулях. [30]

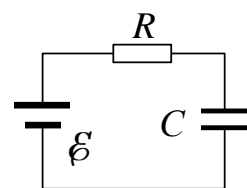


Рис. 5.38

**5.7.12.** Обмотка электрического кипятильника имеет две секции. Если включена только первая секция, вода закипает через  $15\ \text{мин}$ , если только вторая, через  $30\ \text{мин}$ . Через какое время закипит вода, если обе секции включить: последовательно, параллельно? Ответы представьте в минутах. [45; 10]

**5.7.13.** Найдите силу тока короткого замыкания аккумуляторной батареи, если при силе тока  $5\ \text{А}$  батарея отдает во внешнюю цепь мощность  $9,5\ \text{Вт}$ , а при силе тока  $8\ \text{А}$  –  $14,4\ \text{Вт}$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [62]

**5.7.14.** При силе тока 3 А во внешней цепи выделяется мощность 18 Вт, а при силе тока 1 А – 10 Вт. Определите ЭДС источника. Ответ представьте в единицах СИ. [12]

**5.7.15.** Гальванический элемент замыкается один раз на сопротивление 4 Ом, другой раз на сопротивление 9 Ом. В том и другом случаях количество теплоты, выделяющееся за одно и то же время, оказывается одинаковым. Каково внутреннее сопротивление элемента? Ответ представьте в единицах СИ. [6]

**5.7.16.** ЭДС источника 2 В, внутреннее сопротивление 1 Ом. При каких значениях силы тока внешняя цепь потребляет мощность 0,75 Вт? Ответ представьте в единицах СИ. [1,5; 0,5]

**5.7.17.** Батарея состоит из пяти последовательно соединенных элементов с ЭДС 1,4 В и внутренним сопротивлением 0,3 Ом каждый. Мощность во внешней цепи равна 8 Вт. При каких значениях силы тока это возможно? Ответ представьте в единицах СИ. [2 или 8/3]

**5.7.18.** Специальное устройство при помощи электродвигателя поднимает клеть массой 3 т на высоту 5 м за 10 с. Определите КПД этого подъемника, если мощность его электродвигателя 16 кВт. Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [94]

**5.7.19.** Электромотор питается от источника напряжением 24 В. При силе тока в цепи 8 А механическая мощность на валу 96 Вт. Какой ток (в амперах) будет протекать в цепи, если якорь электромотора остановить? [16]

**5.7.20.** Какое количество меди выделилось из раствора медного купороса за 100 с, если ток, протекающий через электролит, изменялся по закону  $I(t) = (5 - 0,02t)$  А, где  $t$  – в секундах? Валентность меди принять равной 2. Ответ представьте в граммах и округлите до сотых. [0,13]

**5.7.21.** Между полюсами магнита на двух тонких проволочках подвешен горизонтально линейный проводник массой 10 г и длиной 20 см. Вектор магнитной индукции направлен вертикально и равен по модулю 0,25 Тл. На какой угол от вертикали отклонятся проволочки, если проводник находится в магнитном поле, а сила тока в нем 2 А? Ответ представьте в градусах. [45]

**5.7.22.** Проводник длиной 0,6 м и сопротивлением 0,025 Ом перемещается поступательно в плоскости, перпендикулярной магнитному полю с индукцией 0,5 мТл. По проводнику течет ток 4 А. Скорость движения проводника 0,8 м/с. Во сколько раз мощность, затраченная на нагревание проводника, больше мощности, затраченной на перемещение проводника в магнитном поле? Ответ округлите до целого числа. [417]

**5.7.23.** Под действием однородного магнитного поля в нем движется с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$  прямолинейный проводник с поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$ . Направление движения проводника перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводнику течет ток силой 1 А. Плотность материала проводника  $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Определите (в миллitesлах) индукцию магнитного поля. [5]

**5.7.24.** Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите период его вращения. Ответ представьте в наносекундах и округлите до десятых. [0,1]

**5.7.25.** В однородном магнитном поле с индукцией 60 Тл находится рамка площадью  $40 \text{ см}^2$ . Сначала рамка располагается перпендикулярно к линиям индукции, затем ее повернули на  $1/8$  оборота. Чему равно изменение магнитного потока, пронизывающего контур? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [-0,07]

**5.7.26.** В однородном магнитном поле с индукцией 0,05 Тл вращается стержень длиной 1 м с постоянной угловой скоростью 20 рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям индукции магнитного поля перпендикулярно к стержню (рис. 5.39). Определите разность потенциалов, возникающую на концах стержня. Ответ представьте в единицах СИ. [0,5]

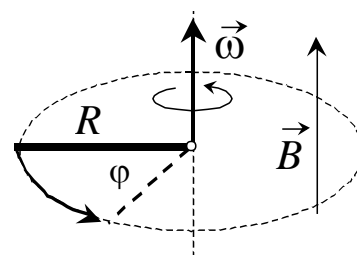


Рис. 5.39

**5.7.27.** Проволочный виток диаметром 8 см и сопротивлением 0,01 Ом находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,04 Тл. Плоскость витка составляет угол  $30^\circ$  с линиями поля. Какое количество электричества протечет по витку, если магнитное поле выключить? Ответ представьте в милликулонах и округлите до целого числа. [10]

**5.7.28.** Круглый виток провода замкнут на конденсатор емкостью 20 мкФ. Нормаль к плоскости витка составляет угол  $60^\circ$  с направлением вектора магнитной индукции. Определите скорость изменения индукции магнитного поля, если заряд на пластинах конденсатора равен  $1 \cdot 10^{-9}$  Кл. Диаметр витка 8 см. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,02]

**5.7.29.** Кольцо радиусом 10 см из медной проволоки диаметром 1 мм помещено в однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл так, что плоскость кольца перпендикулярна линиям индукции. Кольцо деформируют в квадрат. Какое количество электричества протечет через сечение проволоки? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,5]

**5.7.30.** Два проводящих кольца 1 и 2 разных диаметров расположены в одной плоскости в однородном магнитном поле, индукция которого с течением времени равномерно возрастает. В каком кольце (1) или (2) индуцируется больший ток, если массы колец одинаковы и кольца изготовлены из одного и того же материала? [Токи одинаковы]

## 5.8.

**5.8.1.** Электрическая лампочка накаливания потребляет ток силой 0,2 А. Диаметр вольфрамового волоска 0,02 мм. Температура вольфрама при горении лампы  $2000^\circ\text{C}$ . Определите напряженность поля в волоске, считая поле однородным. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [281]

**5.8.2.** Куб из проволочек, каждая из которых имеет сопротивление 1 Ом, включен в цепь, как показано на рис. 5.40. Найдите полное сопротивление куба. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,83]

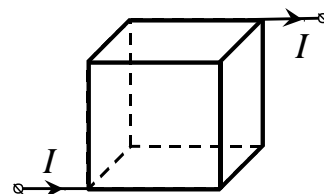


Рис. 5.40

**5.8.3.** Два цилиндрических проводника равной длины, изготовленные из одного и того же материала, соединены последовательно. Найдите отношение температур проводников при подключении их в сеть, если площадь поперечного сечения первого из них в четыре раза больше, чем второго, а теплоотдача пропорциональна площади поверхности проводника и разности температур проводника и окружающей среды. Темпе-

ратура окружающей среды  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При решении задачи зависимость удельного сопротивления проводников от температуры не учитывайте ( $\rho(T) = \text{const}$ ), температуру проводника и окружающей среды выражайте в градусах Цельсия. [ $t_2/t_1 = 8$ ]

**5.8.4.** Напряжение на шинах электростанции равно  $10\text{ кВ}$ , расстояние до потребителя  $500\text{ км}$ . Станция должна передать потребителю мощность  $100\text{ кВт}$ . Потери напряжения в линии  $4\%$ . Найдите массу медных проводов на участке электростанция – потребитель. Ответ представьте в килотоннах и округлите до сотых. [3,94]

**5.8.5.** Определите среднюю скорость упорядоченного движения свободных электронов в медном проводнике сечением  $1\text{ мм}^2$ , если сила тока в нем  $10\text{ А}$ . Принять, что на каждый атом меди приходится по два электрона проводимости. Ответ представьте в миллиметрах за секунду и округлите до сотых. [0,37]

**5.8.6.** Ученик собрал электрическую цепь, состоящую из батарейки (1), реостата (2), ключа (3), амперметра (4) и вольтметра (5). После этого он провел измерения напряжения на полюсах и силы тока в цепи при различных сопротивлениях внешней цепи (рис. 5.41). Определите силу тока короткого замыкания батарейки. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [6,12]

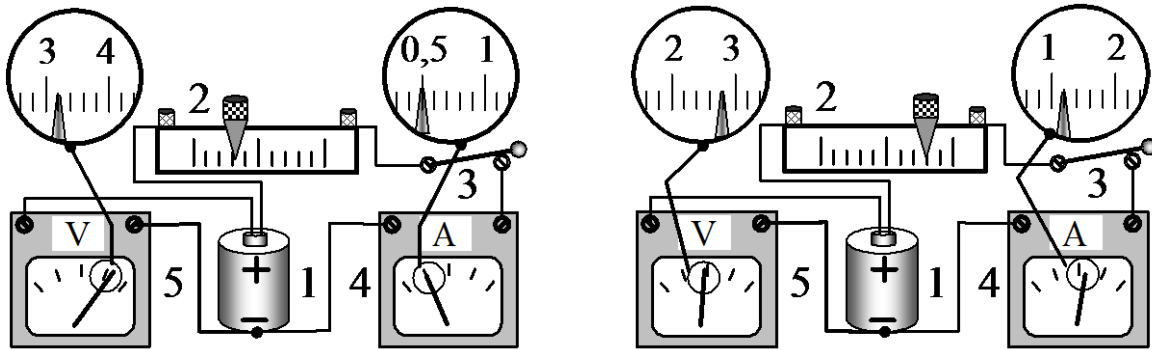


Рис. 5.41

**5.8.7.** Источники тока, имеющие одинаковые внутренние сопротивления  $0,5\text{ Ом}$ , подключены к резисторам, каждый из которых имеет сопротивление  $R$  (рис. 5.42). ЭДС источников тока:  $\mathcal{E}_1 = 12\text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 6\text{ В}$ . Найдите величину сопротивления  $R$ , при котором ток, протекающий через источник  $\mathcal{E}_2$ , равен нулю? Ответ представьте в единицах СИ. [1]

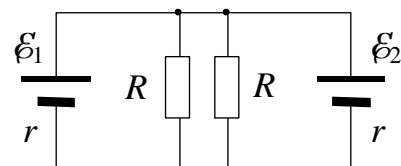


Рис. 5.42

**5.8.8.** Цепь, приведенная на рис. 5.43, собрана из одинаковых резисторов сопротивлением  $R$  и одинаковых вольтметров сопротивлением  $r$ . Первый вольтметр показывает 10 В, а третий – 8 В. Какое напряжение показывает второй вольтметр? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [8,6]

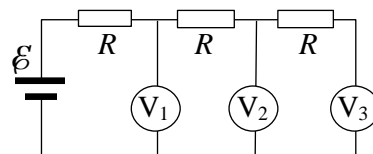


Рис. 5.43

**5.8.9.** При длительном протекании тока 1,4 А через проволоку последняя нагрелась до температуры 55 °С, а при протекании тока 2,8 А до температуры 160 °С. До какой температуры нагреется проволока при токе 5,5 А? Теплоотдача с единицы поверхности проволоки пропорциональна разности температур проволоки и воздуха. Температура воздуха неизвестна. Зависимостью сопротивления проволоки от температуры пренебречь. Ответ представьте в градусах Цельсия и округлите до целого числа. [560]

**5.8.10.** При никелировании пластины ее поверхность покрывается слоем никеля толщиной 0,05 мм. Определите среднюю плотность тока, если никелирование длилось 2,5 ч. Валентность никеля принять равной 2. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [161]

**5.8.11.** При серебрении пластины через раствор нитрата серебра протекает ток плотностью 2 кА/м<sup>2</sup>. С какой средней скоростью растет толщина серебряного покрытия пластины? Валентность серебра принять равной 1. Ответ представьте в мкм/с и округлите до сотых. [0,21]

**5.8.12.** Вакуумный диод, у которого анод (положительный электрод) и катод (отрицательный электрод) – параллельные пластины, работает в режиме, когда между током и напряжением выполняется соотношение  $I = aU^{3/2}$ , где  $a$  – постоянная величина. Во сколько раз увеличится сила, действующая на анод из-за удара электронов, если напряжение на диоде увеличить в два раза? Начальную скорость вылетающих электронов считать равной нулю. [4]

**5.8.13.** Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом 45° к линиям индукции и движется по спирали. Определите радиус спирали, если частица смещается за один оборот вдоль линий индукции поля на 6,28 см. Ответ представьте в сантиметрах. [1]

**5.8.14.** Электрон со скоростью  $6,28 \cdot 10^5$  м/с влетает под углом  $30^\circ$  к силовым линиям параллельных электрического и магнитного полей. Сколько оборотов совершит частица до момента начала движения в обратном направлении, если напряженность электрического поля 500 В/м, а индукция магнитного 0,1 Тл? Ответ округлите для целого числа. [17]

**5.8.15.** Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $10^4$  В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое ( $E = 10$  кВ/м) и магнитное ( $B = 0,1$  Тл) поля (рис. 5.44). Найдите отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. Ответ представьте в мегакулонах на килограмм. [0,5]

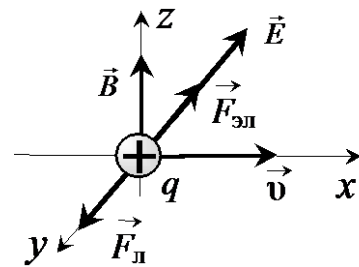


Рис. 5.44

**5.8.16.** В кинескопе телевизора разность потенциалов между катодом и анодом 16 кВ. Отклонение электронного луча при горизонтальной развертке осуществляется магнитным полем, создаваемым двумя катушками. Ширина области, в которой электроны пролетают через магнитное поле, равна 10 см. Какова индукция отклоняющего магнитного поля при угле отклонения электронного луча  $30^\circ$ ? Ответ представьте в миллитеслах и округлите до целого числа. [2]

**5.8.17.** На непроводящей поверхности лежит проводящая жесткая тонкая рамка в виде равностороннего треугольника ADC со стороной, равной  $a$  (рис. 5.45). Рамка находится в однородном горизонтальном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен стороне CD и по модулю равен  $B$ . Какой силы ток  $I$  нужно пропустить по рамке (по часовой стрелке), чтобы она начала приподниматься относительно стороны CD, если масса рамки  $m$ ? [ $I \geq 2mg/(3aB)$ ]

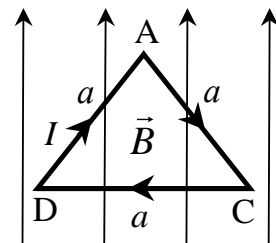


Рис. 5.45

**5.8.18.** Плоская горизонтальная фигура площадью  $0,1$  м<sup>2</sup>, ограниченная проводящим контуром с сопротивлением 5 Ом, находится в однородном магнитном поле. Пока проекция вектора магнитной индукции на вертикальную ось  $z$  медленно и равномерно возрастает от  $B_{1z} = -1,5$  Тл до некоторого конечного значения  $B_{2z}$  по контуру протекает заряд 0,08 Кл. Найдите  $B_{2z}$ . Ответ представьте в единицах СИ. [2,5]

**5.8.19.** Алюминиевое кольцо расположено в однородном магнитном поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору магнитной индукции. Диаметр кольца 25 см, толщина провода 2 мм. Определите скорость изменения индукции магнитного поля со временем, если при этом в кольце возникает индукционный ток 12 А. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [1,71]

**5.8.20.** Проводящая перемычка AD длиной 1 м скользит в однородном магнитном поле с индукцией 10 Тл по горизонтальным проводящим рельсам, замкнутым на резистор сопротивлением 1 Ом (рис. 5.46). Какой величины силу (в ньютонах) нужно приложить к перемычке, чтобы двигать ее с постоянной скоростью 1 м/с? [100]

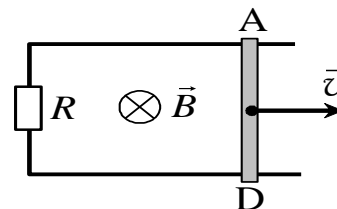


Рис. 5.46

**5.8.21.** Медный куб с длиной ребра 0,1 м скользит по столу с постоянной скоростью 10 м/с, касаясь стола одной из плоских поверхностей. Вектор магнитной индукции, модуль которого равен 0,2 Тл, направлен вдоль поверхности стола перпендикулярно вектору скорости куба. Найдите модуль вектора напряженности электрического поля, возникающего внутри металла, и модуль разности потенциалов между центром куба и одной из его вершин. Ответы представьте в единицах СИ. [2; 0,1]

**5.8.22.** Под действием силы  $F_A$  легкий тонкий проводник BC скользит без трения по горизонтальным параллельным шинам (рис. 5.47) с постоянной скоростью 0,8 м/с в однородном магнитном поле 0,2 Тл, линии индукции которого образуют с нормалью к плоскости контура угол  $60^\circ$ . Найдите количество теплоты, выделяющейся в контуре ABCD за 1 с, если расстояние между шинами равно 0,16 м, а сопротивление проводника BC в расчете на единицу длины равно 0,1 Ом/м. Сопротивление шин, перемычки AD и контактов пренебрежимо мало. Ответ представьте в миллиджоулях и округлите до десятых. [10,2]

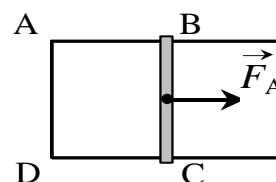


Рис. 5.47

**5.8.23.** По П-образному проводнику постоянно сечением со скоростью 1 м/с, скользит проводящая перемычка ab такого же сечения длиной  $l$  (рис. 5.48). Проводники помещены в однородное магнитное поле, вектор индукции  $\vec{B}$  которого направлен перпендикулярно плоскости проводников ( $B = 0,1$  Тл). Определите напря-

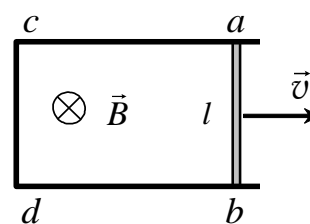


Рис. 5.48



женность электрического поля в перемычке в тот момент, когда  $ac = ab$ . Сопротивление между проводниками в точках контакта пренебрежимо мало. Ответ представьте в единицах СИ. [0,075]

**5.8.24.** Тонкий проводящий стержень  $OA$  равномерно вращается вокруг точки  $O$  перпендикулярно линиям индукции  $0,3$  Тл однородного магнитного поля (рис. 5.49). Конiec  $A$  стержня касается при этом тонкого проводящего кольца, ограничивающего на плоскости круг радиусом  $40$  см. Сопротивление  $R$  резистора, подключенного между точками  $O$  и  $O_1$ , равно  $4$  Ом. Какова угловая скорость вращения стержня  $OA$ , если на резисторе за  $1$  с выделяется количество теплоты  $360$  мДж? Сопротивление стержня, кольца, соединительных проводов и контактов пренебрежимо мало. Ответ представьте в единицах СИ. [50]

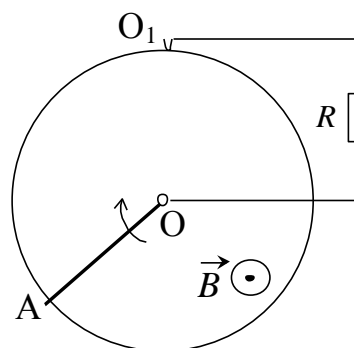


Рис. 5.49

**5.8.25.** Квадратная рамка из медной проволоки, площадь которой  $25$  см<sup>2</sup>, помещена в однородное магнитное поле с индукцией  $0,1$  Тл. Нормаль к плоскости рамки параллельна вектору магнитной индукции. Площадь сечения проволоки рамки  $1$  мм<sup>2</sup>. Какой заряд пройдет по рамке после выключения поля? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до тысячных. [0,074]

**5.8.26.** По двум горизонтальным параллельным проводникам, отстоящим друг от друга на  $0,5$  м, перемещают с постоянной скоростью  $10$  м/с проводник-перемычку (рис. 5.50). Между левыми концами проводников включены последовательно два конденсатора, причем емкость второго в  $1,5$  раза больше емкости первого. Вся система находится в однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости, в которой лежат проводники. Найдите величину индукции магнитного поля, если на втором конденсаторе напряжение равно  $0,5$  В. Ответ представьте в единицах СИ. [0,25]

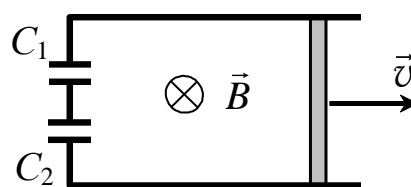


Рис. 5.50

**5.8.27.** В однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл расположен плоский проволочный виток так, что его плоскость перпендикулярна к линиям индукции. Виток замкнут на гальванометр. Полный заряд, протекающий через гальванометр при повороте витка, равен  $7,5 \cdot 10^{-3}$  Кл. На

какой угол повернули виток? Площадь витка  $10^3 \text{ см}^2$ , сопротивление витка 2 Ом. Ответ представьте в градусах. [120]

**5.8.28.** В цилиндрическом сердечнике радиусом  $R = 0,1 \text{ м}$  создано однородное магнитное поле, направленное вдоль оси цилиндра. Индукция магнитного поля изменяется по закону  $B = kt$ , где  $k = 0,1 \text{ Тл/с}$ . Определите напряженность вихревого электрического поля на расстояниях  $r_1 = 0,08 \text{ м}$  и  $r_2 = 0,2 \text{ м}$  от оси цилиндра. Ответы представьте в милливольтгах на метр. [4; 2,5]

**5.8.29.** В циклотроне поддерживается разность потенциалов между дуантами, равная 500 В (рис. 5.51). Чему равен радиус конечной орбиты иона бериллия  $\text{Be}^{++}$ , если он, двигаясь в магнитном поле с индукцией 1,53 Тл, успел совершить  $5 \cdot 10^4$  оборотов? Масса иона бериллия  $1,5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,4]

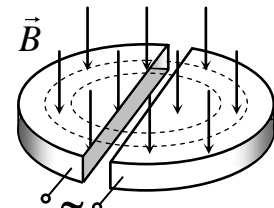


Рис. 5.51

**5.8.30.** Кольцо из тонкой проволоки сопротивлением  $R$  ограничивает на плоскости круг площадью  $S = 0,1 \text{ м}^2$ , в пределах которого внешнее магнитное поле однородно. Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости круга (рис. 5.52, вид сверху). За пределами круга магнитное поле пренебрежимо мало. Какое напряжение покажет вольтметр с внутренним сопротивлением  $r$ , подключенный к точкам 1 и 2, которые делят длину кольца в отношении 1:3? Магнитное поле изменяется с течением времени  $t$  так, что  $\Delta B/\Delta t = 0,01 \text{ Тл/с}$ ;  $r/R = 10$ . Ответ представьте в милливольтгах и округлите до целого числа [245]

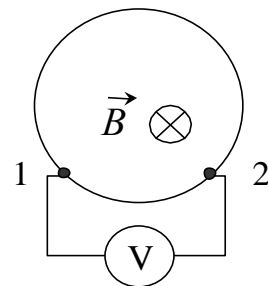


Рис. 5.52

**5.8.31.** \*Электрическая цепь составлена из источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}$ , внутреннее сопротивление которого 2 Ом, и подключенных параллельно к источнику тока резисторов (рис. 5.53). Сопротивление резистора  $R_1 = 10 \text{ Ом}$  неизменно, а сопротивление  $R_2$  можно подобрать так, чтобы выделяемая в этом резисторе мощность была максимальной. Найдите значение  $R_2$ , соответствующее этой максимальной мощности. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,7]

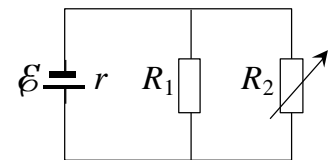


Рис. 5.53

**5.8.32.** \*Заряженная частица движется в однородных взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях (рис. 5.54). В некоторый момент времени вектор начальной скорости  $\vec{v}_0$  перпендикулярен  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ . При этом выполняется соотношение  $E/(v_0B) \ll 1$ . В те моменты времени, когда скорость частицы направлена противоположно  $\vec{v}_0$ , отношение изменения кинетической энергии частицы к её начальной кинетической энергии равно  $\beta = 0,1$ . Найдите отношение  $E/(v_0B)$ . [ $E/(v_0B) = \beta/4 = 0,025$ ]

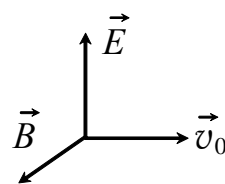


Рис. 5.54

**5.8.33.** \*По обмотке длинного цилиндрического соленоида радиусом 0,1 м протекает постоянный ток, создающий внутри соленоида однородное магнитное поле с индукцией 0,02 Тл. Между витками соленоида в него влетел по радиусу (перпендикулярно оси соленоида, рис. 5.55) протон со скоростью  $2 \cdot 10^5$  м/с. Отклоняясь в магнитном поле, протон спустя некоторое время покинул соленоид. Определите время движения протона внутри соленоида. Ответ представьте в микросекундах и округлите до десятых. [0,8]

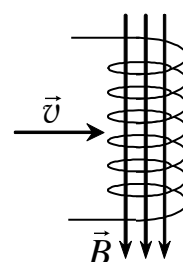


Рис. 5.55

**5.8.34.** \*Имеются две проволоки одинаковой длины, но разного квадратного сечения, изготовленные из одного и того же материала. Сторона сечения первой проволоки  $d_1 = 1$  мм, второй –  $d_2 = 4$  мм. Для того чтобы расплавить первую проволоку, через нее нужно пропустить ток  $I_1 = 10$  А. Определите силу тока  $I_2$ , который нужно пропустить через вторую проволоку, чтобы она расплавилась. Считать, что количество теплоты, уходящее в окружающую среду за 1 секунду, подчиняется закону  $Q = kS(T - T_{cp})$ , где  $S$  – площадь поверхности проволоки,  $T$  – температура проволоки,  $T_{cp}$  – температура окружающей среды,  $k$  – коэффициент пропорциональности, одинаковый для обеих проволок. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [80]

**5.8.35.** \*Заряженный конденсатор емкостью  $C_0 = 1$  мкФ замкнут на катушку индуктивностью  $L = 1$  мГн. Найдите такую зависимость изменения от времени емкости конденсатора, при которой ток в цепи нарастает прямо пропорционально времени. [ $C = C_0 \left(1 - \frac{t^2}{2LC_0}\right) = 10^{-6} (1 - 5 \cdot 10^8 t^2)$ ]

## 6. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Содержание раздела

Механические колебания и волны. Гармонические колебания. Скорость и ускорение гармонических колебаний. Амплитуда колебаний. Период колебаний. Частота колебаний. Свободные колебания. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс. Уравнение гармонической волны. Длина волны. Разность фаз колебаний двух точек среды. Звук. Скорость звука. Громкость звука и высота тона. Уровень интенсивности звука. Стоячие волны.

Электромагнитные колебания и волны. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания. Формула Томсона. Законы изменения заряда, силы тока и напряжения на конденсаторе в колебательном контуре. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс. Переменный ток. Индуктивность и емкость в цепи переменного тока. Полное сопротивление цепи переменному току. Закон Ома для переменного (гармонического) тока. Производство, передача и потребление электрической энергии. Генератор переменного тока. Трансформатор. Электромагнитные волны. Скорость распространения электромагнитных волн. Плотность потока электромагнитного излучения. Зависимость плотности потока электромагнитного излучения от частоты и от расстояния до источника излучения. Различные виды электромагнитных излучений и их практическое применение. Принцип радиосвязи. Амплитудная модуляция. Распространение радиоволн. Радиолокация.

### Основные законы и формулы

#### *Механические колебания и волны*

- Уравнение гармонического колебания

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ или } x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $x(t)$  – смещение материальной точки от положения равновесия в момент времени  $t$ ,  $A$  – амплитуда колебания,  $\omega$  – циклическая (круговая) частота колебания,  $(\omega t + \varphi_0)$  – фаза колебания в момент времени  $t$ ,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебания (при  $t = 0$ );  $A, \omega, \varphi_0 = \text{const}$ .

- Скорость гармонического колебания  $v = \frac{dx}{dt}$ .

Если  $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , то

$$v(t) = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) = A\omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2).$$

- Ускорение гармонического колебания  $a = \frac{dv}{dt}$ .

$$a(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi).$$

- Круговая (циклическая) частота колебания

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu,$$

где  $T$  – период колебания,  $\nu$  – частота колебания.

- Сила, вызывающая гармонические колебания,

$$F = -kx,$$

где  $k = m\omega^2$  – коэффициент квазиупругой силы,  $m$  – масса тела.

Знак “–” отражает тот факт, что сила направлена к положению равновесия – противоположно смещению  $x$  от положения равновесия.

- Полная механическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания,

$$E = E_k + E_n = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kA^2}{2} = \text{const},$$

где  $E_k = \frac{mv^2}{2}$  и  $E_n = \frac{kA^2}{2}$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергия;  $v_m$  – амплитуда скорости гармонического колебания,  $m$  – масса материальной точки.

- Период колебания математического маятника

а) в инерциальной системе отсчета:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где  $l$  – длина нити,  $g$  – ускорение свободного падения;

б) в неинерциальной системе отсчета:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \pm a}},$$

где “+”, если система движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх, и “–”, если система движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вниз.

- Период колебания пружинного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

где  $m$  – масса груза, прикрепленного к пружине,  $k$  – жесткость пружины.

- Уравнение гармонической линейно-поляризованной волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $x$

$$y(x, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right), \text{ или } y(x, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right),$$

где  $y(x, t)$  – смещение от положения равновесия точки с координатой  $x$  в момент времени  $t$ .

- Частота собственных колебаний струны

$$v_n = \frac{v}{2l} n \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $v$  – скорость распространения волны,  $l$  – длина струны.

- Связь между длиной волны  $\lambda$ , скоростью  $v$  распространения волны и периодом  $T$  (или частотой  $\nu$ ):

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu.$$

- Интенсивность  $J$  упругой волны

$$J = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\rho A^2 \omega^2 v}{2},$$

где  $\Delta W$  – энергия, переносимая упругой волной через перпендикулярную к направлению распространения волны поверхность площадью  $S$  за время  $\Delta t$ ,  $\rho$  – плотность среды.

- Мощность  $P$  точечного изотропного источника звука связана с интенсивностью  $J$  звука соотношением

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

где  $r$  – расстояние от источника звука до точки звукового поля, в которой определяется интенсивность.

### *Электромагнитные колебания и волны*

- Период свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре (формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где  $C$  – емкость конденсатора,  $L$  – индуктивность катушки.

- Сила переменного электрического тока

$$I = \frac{dq}{dt},$$

где  $dq$  – величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время  $dt$ .

- Мгновенные значения ЭДС, напряжения и силы переменного (гармонического) тока

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t, \quad u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin \omega t,$$

где  $\mathcal{E}_m$ ,  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитуды ЭДС, напряжения и силы тока.

- Реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивностью  $L$

$$X_L = \omega L.$$

- Реактивное емкостное сопротивление конденсатора емкостью  $C$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

- Полное сопротивление электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$ , переменному току,

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

- Закон Ома для цепи переменного (гармонического) тока

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}.$$

- Действующие значения силы тока, напряжения и ЭДС переменного тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}.$$

- Количество теплоты, выделяющееся в резисторе с активным сопротивлением  $R$  при протекании по нему переменного тока в течение времени  $t$ ,

$$Q = \frac{I_m^2 R t}{2} = \frac{U_m^2}{2R} t.$$

- Коэффициент трансформации (в режиме «холостого хода»)

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

где  $N_1$ ,  $N_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора,  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжение на клеммах первичной и вторичной обмоток.

- Коэффициент трансформации (в режиме нагрузки)

$$k = \frac{U_1}{U_2 + I_2 r_2},$$

где  $I_2 r_2$  – падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

- КПД трансформатора

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1},$$

где  $I_1, I_2$  – сила тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

- Связь между длиной электромагнитной волны  $\lambda$  в вакууме, скоростью электромагнитной волны  $c$  в вакууме и периодом  $T$  (или частотой  $\nu$ )

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu.$$

- Объемная плотность энергии электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме,

$$w_{\text{эм}} = W/V = \epsilon_0 E_m^2,$$

где  $W$  – энергия электромагнитного поля, сосредоточенного в объеме  $V$ ,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $E_m$  – амплитуда напряженности электрического поля электромагнитной волны.

- Поток энергии электромагнитной волны – энергия электромагнитного излучения, проходящего в единицу времени (мощность  $P_{\text{эм}}$ ) через поверхность площадью  $S$ ,

$$\Phi_W = P_{\text{эм}} = \Delta W / \Delta t.$$

- Плотность потока энергии электромагнитной волны – мощность электромагнитного излучения, проходящего через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны,

$$\frac{\Phi_W}{S} = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

- Интенсивность электромагнитной волны – среднее значение плотности потока энергии электромагнитной волны

$$J = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = w_{\text{эм}} c = c \epsilon_0 \langle E^2 \rangle,$$

где  $\langle E^2 \rangle$  – среднее значение квадрата напряженности электрического поля за период колебания.

- Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника:  $J \sim 1/r^2$  и прямо пропорциональна четвертой степени частоты колебаний:  $J \sim \nu^4$ .



## Примеры решения задач

**6.1.** Закон движения материальной точки массой  $m = 100$  г имеет вид:  $x = 0,1 \cdot \sin(2\pi t + \pi/4)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Определите в момент  $t = T/4$ :

- 1) смещение  $x$  точки от положения равновесия;
  - 2) скорость  $v$  точки;
  - 3) ускорение  $a$  точки;
  - 4) силу  $F$ , действующую на материальную точку.
- Ответы представьте в единицах СИ и округлите до сотых.

Дано:  $x = 0,1 \cdot \sin(2\pi t + \pi/4)$ ,  $t = T/4$ ,  $\omega = 2\pi \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi_0 = \pi/4$ ,  $m = 0,1$  кг.

Определить  $x$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $F$ .

**Решение.**

1) В общем виде закон движения материальной точки, совершающей гармонические синусоидальные колебания, имеет вид

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $x(t)$  – смещение (координата) точки от положения равновесия в момент времени  $t$ ,  $A$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – циклическая (круговая) частота колебаний,  $(\omega t + \varphi_0)$  – фаза колебаний,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

Циклическая частота колебаний  $\omega$  связана с периодом  $T$  колебаний соотношением

$$\omega = 2\pi/T. \quad (2)$$

Используя соотношение (2), преобразуем уравнение (1) и найдем:

$$x\left(\frac{T}{4}\right) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} + \frac{\pi}{4}\right) = 0,1 \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \approx 0,07 \text{ м.}$$

2) Чтобы найти закон изменения скорости  $v(t)$ , продифференцируем  $x(t)$  – возьмем первую производную от закона движения  $x(t)$  по времени:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) = v_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right), \quad (3)$$

где  $v_m = A\omega$  – амплитуда колебаний скорости.

Используя соотношение (2), преобразуем уравнение (3) и найдем:

$$v\left(\frac{T}{4}\right) = A \cdot 2\pi \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} + \frac{\pi}{4}\right) = 0,1 \cdot 2\pi \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) \approx -0,44 \text{ м/с.}$$

3) Для нахождения зависимости ускорения от времени  $a(t)$  возьмем первую производную от закона изменения скорости  $v(t)$  по времени:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) = -a_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) = -\omega^2 x. \quad (4)$$

где  $a_m = A\omega^2$  – амплитуда колебаний ускорения.

Используя соотношение (2), преобразуем уравнение (4) и найдем:

$$a\left(\frac{T}{4}\right) = -A\omega^2 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} + \frac{\pi}{4}\right) = -0,1 \cdot (2\pi)^2 \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) = -2,79 \text{ м/с}^2.$$

4) По второму закону Ньютона, сила, вызывающая гармонические колебания,

$$F = ma = -Am\omega^2 \sin(\omega t + \pi/4). \quad (5)$$

В очередной раз используя (2), получим

$$F(T/4) = -Am(2\pi)^2 \sin(3\pi/4) = -0,1 \cdot 0,1 \cdot (2\pi)^2 \sin(3\pi/4) \approx -0,28 \text{ Н.}$$

Знак «минус» в уравнениях (4) и (5) отражает тот факт, что сила  $F$ , вызывающая гармонические колебания, и ускорение  $a$  гармонического колебания прямо пропорциональны смещению  $x$  тела от положения равновесия и всегда направлены в сторону противоположную смещению тела от положения равновесия, то есть к положению равновесия.

**6.2. Гармонические колебания. Пружинный маятник.** Груз массой  $m = 0,5$  кг совершает гармонические колебания на невесомой пружине. На какую величину  $\Delta m$  нужно изменить массу груза, чтобы период колебаний увеличился в  $n = 3$  раза? Ответ представьте в единицах СИ.

Дано:  $m = 0,5$  кг,  $n = 3$ .

Определить  $\Delta m$ .

**Решение.** Период колебаний груза массой  $m$  на пружине жесткостью  $k$  определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1)$$

Учитывая, что, согласно уравнению (1), период колебаний возрастает при увеличении массы маятника, запишем формулу для периода колебаний пружинного маятника при изменении массы груза:

$$nT = 2\pi \sqrt{\frac{m + \Delta m}{k}}, \quad (2)$$

Возведем уравнения (1) и (2) в квадрат:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}, \quad (3)$$

$$n^2 T^2 = 4\pi^2 \frac{m + \Delta m}{k}. \quad (4)$$

Разделив левые и правые части уравнений (3) и (4) друг на друга, получим

$$n^2 = (m + \Delta m)/m. \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно  $\Delta m$ , найдем:

$$\Delta m = (n^2 - 1)m = 8m = 4 \text{ кг}.$$

**6.3. Гармонические колебания.** Определите период малых колебаний ареометра (рис. 6.1), которому сообщили небольшой толчок в вертикальном направлении. Масса ареометра  $m = 50$  г, диаметр его трубки  $d = 6,4$  мм, плотность жидкости  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Сопротивление жидкости пренебрежимо мало. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых.



Рис. 6.1

Дано:  $m = 0,05 \text{ кг}$ ,  $d = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Определить  $T$ .

**Решение.** На ареометр действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила Архимеда  $\vec{F}_A$ . При равновесии

$$m\vec{g} + \vec{F}_A = 0. \quad (1)$$

Пусть положительное направление оси  $Ox$  направлено вниз (рис. 6.2). В проекциях на ось  $Ox$  уравнение (1) примет вид

$$mg - \rho_{\text{ж}} V_{\text{п0}} g = 0, \quad (2)$$

где  $V_{\text{п0}}$  – объем погруженной в жидкость части ареометра при его равновесном положении;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости.

Отсюда при равновесии сила тяжести равна по модулю силе Архимеда:

$$mg = \rho_{\text{ж}} V_{\text{п0}} g, \quad (3)$$

Если ареометр погрузить в жидкость на некоторую глубину  $x$  ниже положения равновесия, объем погруженной части ареометра станет равным  $V_{\text{п0}} + Sx = V_{\text{п0}} + (\pi d^2 x)/4$ , где  $d$  – диаметр трубки. В результате сила Архимеда  $F_{A1} = \rho_{\text{ж}}(V_{\text{п0}} + Sx)g$  станет больше силы тяжести и будет стремиться возвратить ареометр в положение равновесия.

По второму закону Ньютона

$$m\vec{g} + \vec{F}_{A1} = m\vec{a}. \quad (4)$$

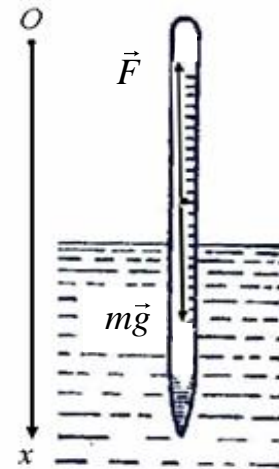


Рис. 6.2

В проекциях на ось  $Ox$ :

$$ma = mg - \rho_{\text{ж}}(V_{\text{п0}} + Sx)g. \quad (5)$$

Учитывая (2), преобразуем уравнение (5)

$$ma = -\rho_{\text{ж}}Sgx.$$

Отсюда выражение для равнодействующей силы  $F$  можно представить в виде

$$F = ma = -kx,$$

где  $k = \rho_{\text{ж}}Sg$ .

Таким образом, движение ареометра, погруженного в жидкость на некоторую глубину  $x$  ниже положения равновесия, происходит под действием равнодействующей силы  $F = -kx$ , пропорциональной смещению тела от положения равновесия и направленной в сторону, противоположную по направлению смещению. Под действием силы, изменяющейся по такому закону, ареометр будет совершать гармонические колебания. Поскольку

$$k = m\omega^2 = \rho_{\text{ж}}Sg = (\rho_{\text{ж}}\pi d^2 g)/4,$$

циклическая частота  $\omega$  колебаний ареометра

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}Sg}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}\pi d^2 g}{4m}}.$$

Отсюда период колебаний ареометра

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 4\pi \sqrt{\frac{m}{\rho_{\text{ж}}g\pi d^2}} = \frac{4}{d} \sqrt{\frac{m\pi}{\rho_{\text{ж}}g}} \approx 2,5 \text{ с.}$$

**6.4. Математический маятник.** Математический маятник длиной  $l = 10$  см совершает колебания вблизи вертикальной стенки, в которую на расстоянии  $l_1 = 5l/9$  от точки подвеса вбит гвоздь  $\Gamma$  (рис. 6.3). Определите частоту  $\nu$  колебаний такого маятника. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых.

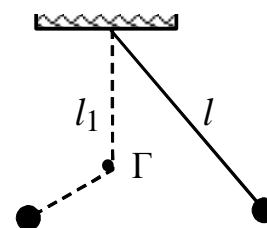


Рис. 6.3

Дано:  $l = 10$  см,  $l_1 = 5l/9$ ,  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

Определить  $\nu$ .

**Решение.** Период колебаний математического маятника определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Период колебаний рассматриваемого маятника можно определить как сумму полупериодов двух маятников с длинами  $l$  и  $l_2 = l - l_1$ :

$$T = \pi \left( \sqrt{\frac{l}{g}} + \sqrt{\frac{l_2}{g}} \right) = \pi \left( \sqrt{\frac{l}{g}} + \sqrt{\frac{l-l_1}{g}} \right) = \pi \left( \sqrt{\frac{l}{g}} + \sqrt{\frac{4l}{9g}} \right) = \frac{5\pi}{3} \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Тогда, используя формулу, связывающую частоту  $\nu$  колебаний маятника с периодом  $T$  колебаний, найдем:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{3}{5\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \approx 1,9 \text{ с}.$$

**6.5. Закон сохранения энергии.** Смещение груза пружинного маятника изменяется с течением времени по закону  $x(t) = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ , где  $T = 2$  с. Через какое минимальное время, начиная с момента  $t = 0$ , кинетическая энергия маятника достигнет половины своего максимального значения?

Дано:  $x(t) = A \sin(2\pi t / T)$ ,  $T = 2$  с.

Определить  $t_{\min}$ .

**Решение.** Максимальное значение кинетической энергии маятника равно:

$$E_{\text{кин. max}} = \frac{mv_m^2}{2}, \quad (1)$$

где  $v_m$  – амплитуда колебаний скорости маятника.

Для определения  $v_m$ , продифференцировав закон движения маятника  $x(t)$  по времени, получим закон изменения скорости гармонического колебания маятника

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = A \cdot \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right). \quad (2)$$

Из уравнения (2) выразим амплитуду колебаний скорости маятника

$$v_m = A \cdot \frac{2\pi}{T}. \quad (3)$$

В соответствии с условиями задачи, учитывая уравнение (3), имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{mv_m^2}{2} \quad \text{или} \quad \frac{mA^2 \cdot 4\pi^2}{2T^2} \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t\right) = m \cdot \frac{A^2 \cdot 4\pi^2}{4T^2}. \quad (4)$$

После упрощений уравнение (4) примет вид

$$\cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно  $t$ , найдем:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}; \quad \frac{2\pi}{T}t_{\min} = \frac{\pi}{4}; \quad t_{\min} = \frac{T}{8} = 0,25 \text{ с.}$$

Отсюда через интервал времени  $t_{\min} = T/8 = 0,25$  с кинетическая энергия пружинного маятника, совершающего косинусоидальные гармонические колебания, достигает половины его максимального значения кинетической энергии.

**6.6. Упругие волны.** Смещение точки от положения равновесия, находящейся на расстоянии  $x = 4$  см от источника колебаний, через промежуток времени  $T/3$  равно половине амплитуды. Определите (в сантиметрах) длину волны и частоту колебаний (в кГц). Волну считать поперечной (рис. 6.4) и распространяющейся в стали.

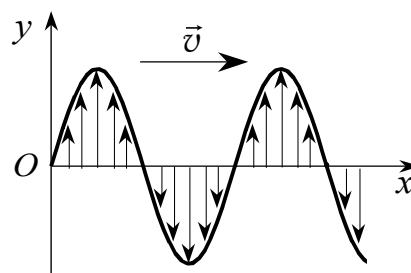


Рис. 6.4

Дано:  $x = 4$  см,  $t = T/3$ ,  $y = A/2$ ,  $v = 5000$  м/с.

Определить  $\lambda$ .

**Решение.** Запишем уравнение поперечной гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $Ox$ ,

$$y(x,t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right), \quad (1)$$

где  $y(x,t)$  – смещение точки среды с координатой  $x$  от положения равновесия, совершаемое в поперечной волне в направлении оси  $Oy$ , перпендикулярной направлению распространения волны – оси  $Ox$ , в момент времени  $t$ ,  $A$  – амплитуда колебаний волны,  $v$  – скорость распространения волны в стали.

Учитывая формулу  $\omega = 2\pi/T$  и условия задачи ( $t = T/3$ ,  $y = A/2$ ), представим уравнение (1) в виде

$$\frac{A}{2} = A \sin \frac{2\pi}{T} \left( \frac{T}{3} - \frac{x}{v} \right). \quad (2)$$

Поскольку  $\arcsin \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6}$ , а  $\lambda = vT$ , получим из уравнения (2)

$$\frac{\pi}{6} = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{T}{3} - \frac{xT}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Решая уравнение (3), относительно  $\lambda$ , найдем:

$$\lambda = 4x = 16 \text{ см.}$$

Частота колебаний  $\nu = v/\lambda = 31,25 \text{ кГц.}$

**6. 7. Упругие волны.** Поперечная волна с частотой  $\nu = 1,2 \text{ Гц}$  распространяется вдоль упругого шнура со скоростью  $v = 15 \text{ м/с}$ . Определите разность фаз  $\Delta\varphi$  колебаний в двух точках, находящихся на одной прямой с источником колебаний на расстоянии  $\Delta x = 1,7 \text{ м}$  друг от друга. Начальную фазу  $\varphi_0$  колебаний в точке с координатой  $x = 0$  принять равной  $0^\circ$ . Ответ представьте в радианах и округлите до сотых.

Дано:  $\nu = 1,2 \text{ Гц}$ ,  $\Delta x = x_2 - x_1 = 1,7 \text{ м}$ ,  $v = 15 \text{ м/с}$ ,  $\varphi_0 = 0$ .

Определить  $\Delta\varphi$ .

**Решение.** Запишем уравнение поперечной волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $x$ , для координат  $x_1$  и  $x_2$  в момент времени  $t$ :

$$y_1(x_1, t) = A \sin \varphi_1 = A \sin \omega \left( t - \frac{x_1}{v} \right), \quad (1)$$

$$y_2(x_2, t) = A \sin \varphi_2 = A \sin \omega \left( t - \frac{x_2}{v} \right), \quad (2)$$

где  $y_1(x_1, t)$  и  $y_2(x_2, t)$  – соответственно смещение точек среды с координатами  $x_1$  и  $x_2$  от положения равновесия в момент времени  $t$ ,  $A$  – амплитуда колебаний,  $v$  – скорость распространения волны в шнуре,  $\varphi_1 = \omega \left( t - \frac{x_1}{v} \right)$  и  $\varphi_2 = \omega \left( t - \frac{x_2}{v} \right)$  – фазы колебаний в точках с координатами  $x_1$  и  $x_2$ .

Уравнения (1) и (2) представим в виде

$$y_1(x_1, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x_1}{v} \right) = A \sin(\omega t - \alpha_1), \quad (3)$$

$$y_2(x_2, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x_2}{v} \right) = A \sin(\omega t - \alpha_2), \quad (4)$$

где  $\alpha_1 = \omega x_1/v$  и  $\alpha_2 = \omega x_2/v$  – соответственно начальные фазы колебаний в точках с координатами  $x_1$  и  $x_2$ .

Разность фаз  $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$  колебаний в двух точках, находящихся на расстояниях  $x_1$  и  $x_2$  от начала координат, равна:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \alpha_1 - \alpha_2 = \omega \frac{x_1 - x_2}{v} = -\omega \frac{\Delta x}{v}. \quad (5)$$

Используя зависимость, связывающую циклическую частоту  $\omega$  с частотой колебаний  $\nu$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ , преобразуем уравнение (5) к виду

$$\Delta\varphi = -2\pi\nu \cdot \frac{\Delta x}{v} \approx -0,85 \text{ рад.}$$

Знак «минус» означает, что колебания в точке с координатой  $x_2$  отстают по фазе от колебаний в точке с координатой  $x_1$  на  $|\Delta\varphi| = 3,14$  рад.

**Примечание.** В случае продольной упругой волны разность фаз при аналогичных условиях задачи также равна:  $\Delta\varphi = -2\pi\nu \cdot \frac{\Delta x}{v} \approx -0,85$  рад.

**6.8. Электромагнитные колебания.** В колебательном контуре происходят свободные незатухающие колебания с энергией  $W_1 = 2$  мДж. Пластины плоского воздушного конденсатора медленно раздвинули так, что циклическая частота колебаний увеличилась в  $n = 3$  раза. Какую работу  $A$  (в миллиджоулях) совершили при этом против электрических сил?

Дано:  $W_1 = 2$  мДж,  $n = 3$ ,  $\varepsilon = 1$ .

Определить  $A$ .

**Решение.** Энергия  $W$  заряженного конденсатора емкостью  $C$  определяется формулой

$$W = \frac{q^2}{2C}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд конденсатора, а емкость  $C$  плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками конденсатора,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $S$  – площадь обкладок конденсатора,  $d$  – расстояние между обкладками конденсатора.

Колебательный контур, в котором происходят свободные электромагнитные колебания, можно рассматривать как изолированную систему. Следовательно, заряд  $q$  конденсатора при раздвижении пластин не изменяется, то есть  $q = \text{const}$ . Поскольку, согласно формуле (2), при раздвижении пластин емкость  $C$  конденсатора уменьшается, то в соответствии с (1) энергия конденсатора при раздвижении пластин увеличивается.

Поэтому работа  $A$  против электрических сил притяжения разноименно заряженных пластин конденсатора приводит к увеличению энергии конденсатора, то есть



$$A = W_2 - W_1, \quad (3)$$

где  $W_1 = q^2/(2C_1)$  и  $W_2 = q^2/(2C_2)$  – соответственно энергия конденсатора до и после раздвижения пластин.

Отсюда

$$A = \frac{q^2}{2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) = \frac{q^2}{2C_1} \left( \frac{C_1}{C_2} - 1 \right) = W_1 \left( \frac{C_1}{C_2} - 1 \right). \quad (4)$$

Циклическая частота свободных незатухающих колебаний в колебательном контуре с индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$  определяется формулой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

Учитывая, заданное в условиях задачи соотношение  $\omega_2/\omega_1 = n$ , решая систему уравнений (2), (5), получим:

$$C_1/C_2 = d_2/d_1 = n^2. \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), найдем:

$$A = W_1(n^2 - 1) = 16 \text{ мДж}.$$

**6.9. Электромагнитные колебания.** Идеальный колебательный контур (рис.6.5) подключен к источнику ЭДС  $\mathcal{E}$  с внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом, при этом по катушке протекает постоянный ток. После размыкания ключа  $K$  в контуре возникают колебания с циклической частотой  $\omega$ , равной  $200 \text{ с}^{-1}$  и амплитудой напряжения на конденсаторе в  $k = 5$  раз больше ЭДС источника. Определите (в микрофарадах) емкость конденсатора. Активным сопротивлением катушки индуктивности и соединительных проводов пренебречь. Ответ представьте в микрофарадах.

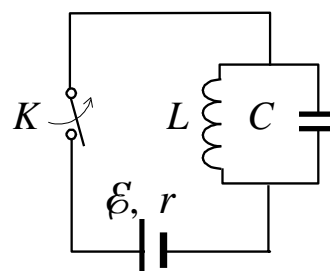


Рис. 6.5

Дано:  $r = 1$  Ом,  $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$ ,  $k = U_m/\mathcal{E} = 5$ .

Определить  $C$ .

**Решение.** Так как активным сопротивлением катушки индуктивности и соединительных проводов можно пренебречь, после размыкания ключа  $K$  в колебательном контуре возникнут незатухающие гармонические электромагнитные колебания с амплитудой колебаний силы тока  $I_m$  и амплитудой колебания напряжения на конденсаторе  $U_m$ .

Циклическая частота незатухающих электромагнитных колебаний определяется формулой

$$\omega = 1/\sqrt{LC}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) емкость конденсатора

$$C = 1/(\omega^2 L). \quad (2)$$

По закону сохранения энергии

$$\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}. \quad (3)$$

Используя соотношение  $k = U_m/\mathcal{E}$ , представим уравнение (3) в виде

$$LI_m^2 = Ck^2 \mathcal{E}^2. \quad (4)$$

Амплитуда колебаний силы тока  $I_m$  равна силе тока, протекавшему в катушке при замкнутом ключе  $K$ . Отсюда по закону Ома

$$I_m = \mathcal{E}/r. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$L = r^2 C k^2. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (2), (6) относительно  $C$ , найдем:

$$C = 1/(k\omega r) = 1000 \text{ (мкФ)}.$$

**6.10. Электромагнитные колебания.** В идеальном колебательном контуре амплитуда колебаний силы тока  $I_m = 5$  мА, а амплитуда напряжения  $U_m = 2,0$  В. В момент времени  $t$  напряжение на конденсаторе  $U = 1,2$  В. Определите силу тока в катушке в этот момент. Ответ представьте в единицах СИ.

Дано:  $U_m = 2,0$  В,  $I_m = 5$  мА,  $U = 1,2$  В.

Определить  $I$ .

**Решение.** По закону сохранения энергии

$$\frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \quad (1)$$

или

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2)$$

Из уравнения (1) имеем

$$I^2 = I_m^2 - \frac{C}{L} U^2. \quad (3)$$

Отношение  $C/L$  выразим из уравнения (2)

$$\frac{C}{L} = \frac{I_m^2}{U_m^2}. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (3) – (4) относительно  $I$ , найдем:

$$I = I_m \sqrt{1 - \frac{U^2}{U_m^2}} = \pm 4 \text{ (мА)}.$$

Если считать положительным ток, заряжающий конденсатор, то знак «+» соответствует току при зарядке конденсатора, а знак «-» току при разрядке конденсатора. Как правило, при решении такого типа задач требуется найти величину тока  $I$  без учета его направления, то есть ответ: 4 мА.

Альтернативное решение. Запишем закон изменения заряда конденсатора

$$q(t) = q_m \cos \omega t. \quad (1)$$

Закон изменения напряжения на конденсаторе

$$U(t) = \frac{q(t)}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t. \quad (2)$$

Закон изменения тока  $I(t)$ , считая положительным ток, заряжающий конденсатор, найдем, продифференцировав функцию  $q(t)$  по времени и используя формулу приведения,

$$I(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -q_m \omega \sin \omega t = -I_m \sin \omega t = I_m \cos(\omega t + \pi/2), \quad (3)$$

где  $I_m = q_m \omega$  – амплитуда колебаний силы тока.

Заметим, что, согласно (2) и (3), колебания тока в идеальном колебательном контуре опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на  $\pi/2$ .

По формуле тригонометрии

$$\sin \omega t = \sqrt{1 - \cos^2 \omega t}. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (2) – (4) относительно  $I$ , найдем:

$$I = I_m \sqrt{1 - \frac{U^2}{U_m^2}} = \pm 4 \text{ (мА)}.$$

**Примечание.** Проиллюстрируем полученное решение графически, рис. 6.6. Представим зависимости  $U(t)$  и  $I(t)$  в виде графиков. Из графиков видно, что, если считать положительным ток, заряжающий конденсатор, из графика  $U(t)$   $U = 1,2$  В при  $t_1 \approx 0,15T$  (разрядка конденсатора) и  $t_2 \approx 0,85T$  (зарядка конденсатора).

Соответственно, в момент  $t_1 \approx 0,15T$  величина тока  $I = -4$  мА и в момент  $t_2 \approx 0,85T$   $I = +4$  мА.

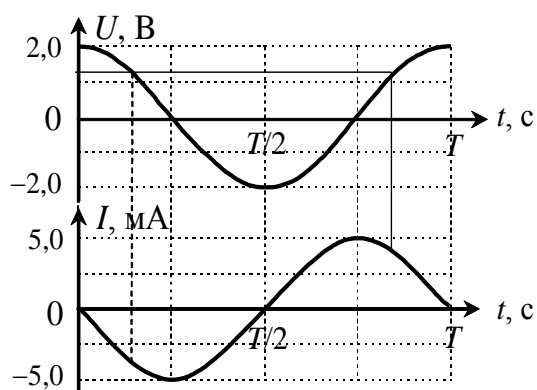


Рис. 6.6

**6.11. Резонанс в колебательном контуре.** Резонансная частота колебаний  $\nu_0$  в колебательном контуре равна  $10^4$  Гц. Конденсатор заряжен до максимального напряжения  $U_m = 10$  В, максимальный ток в контуре  $I_m = 3,14$  А. Определите емкость  $C$  конденсатора. Ответ представьте в микрофарадах. Активным сопротивлением контура пренебречь.

Дано:  $\nu_0 = 10^4$  Гц,  $U_m = 10$  В,  $I_m = 3,14$  А.

Определить  $C$ .

**Решение.** Резонансная частота  $\nu_{\text{рез}}$  колебаний в контуре равна собственной частоте  $\nu_0$  колебательного контура:

$$\nu_{\text{рез}} = \nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

По закону сохранения энергии

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2)$$

Учитывая, что  $q_m = CU_m$ , представим уравнение (2) в виде

$$\frac{(CU_m)^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (3)$$

Из уравнения (1) имеем

$$L = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2 C}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), после преобразований получим

$$(CU_m)^2 = \frac{I_m^2}{4\pi^2\nu_0^2}. \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно  $C$ , найдем:

$$C = \frac{I_m}{2\pi\nu_0 U_m} = 5 \text{ мкФ}.$$

**Альтернативное решение.** Заряд конденсатора при электромагнитных колебаниях в колебательном контуре изменяется по закону

$$q(t) = q_m \cos \omega_0 t = CU_m \cos(2\pi\nu_0 t). \quad (1)$$

Продифференцировав функцию  $q(t)$  по времени и используя тригонометрическую формулу приведения, найдем закон изменения силы тока  $I(t)$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -2\pi\nu_0 CU_m \sin \omega_0 t = 2\pi\nu_0 CU_m \cos(\omega_0 t + \pi/2). \quad (2)$$

Согласно уравнению (2), амплитуда колебаний тока в контуре

$$I_m = 2\pi\nu_0 C U_m. \quad (3)$$

Отсюда

$$C = \frac{I_m}{2\pi\nu_0 U_m} = 5 \text{ мкФ}.$$

**6.12. Переменный ток.** Последовательно с электроплиткой в городскую сеть подключили катушку индуктивности. При этом мощность плитки уменьшилась в  $n = 2$  раза. Определите индуктивность  $L$  катушки, если активное сопротивление плитки  $R = 50$  Ом. Частота городской сети  $\nu = 50$  Гц. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых.

Дано:  $P_1/P_2 = n = 2$ ,  $R = 50$  Ом,  $\nu = 50$  Гц.

Определить  $L$ .

**Решение.** Мощность  $P_1$  в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление  $R$ , определяется зависимостями

$$P_1 = \frac{I_{m1} U_m}{2} = \frac{U_m^2}{2R}, \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения, приложенного к выводам электрической цепи,  $I_{m1}$  – амплитуда силы тока в цепи.

Мощность  $P_2$  в цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление  $R$  и катушку индуктивности  $L$ , определяется формулой

$$P_2 = \frac{I_{m2} U_m \cdot \cos \varphi}{2}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фазы между колебаниями силы тока и напряжения.

После подключения катушки индуктивности электрическая цепь содержит активное и индуктивное сопротивления. В этом случае полное сопротивление  $Z$  цепи переменного тока равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (3)$$

где  $X_L = \omega L$  – реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивности.

По закону Ома для цепи переменного тока амплитуда тока  $I_{m2}$  в цепи

$$I_{m2} = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (4)$$

Величина  $\cos \varphi$  называется коэффициентом мощности и определяется соотношением

$$\cos \varphi = R/Z, \quad (5)$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

Подставив (4) и (5) в (2), приведем уравнение (2) к виду

$$P_2 = \frac{U_m^2}{2} \frac{R}{(R^2 + (\omega L)^2)}. \quad (6)$$

Разделив левые и правые части уравнений (1) и (6) друг на друга, получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = n = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{R^2}. \quad (7)$$

Учитывая, что  $\omega = 2\pi\nu$ , решая уравнение (7) относительно  $L$ , найдем:

$$L = \frac{\sqrt{n-1} \cdot R}{2\pi\nu} \approx 0,16 \text{ Гн.}$$

Альтернативное решение. Активная мощность  $P_1$  в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление  $R$ , определяется формулой

$$P_1 = I_1^2 R, \quad (1)$$

а активная мощность  $P_2$  в цепи, содержащей активное сопротивление  $R$  и катушку индуктивности  $L$ ,

$$P_2 = I_2^2 R, \quad (2)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – действующее значение силы тока в цепи в первом и втором случае.

Разделив левые и правые части уравнений (1) и (2) друг на друга, получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = n = \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \quad \text{или} \quad \sqrt{n} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (3)$$

По закону Ома для цепи переменного тока

$$I_1 = U/R \quad \text{и} \quad I_2 = U/Z, \quad (4)$$

где  $U$  – действующее напряжение, приложенное к выводам электрической цепи,  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

Воспользовавшись соотношениями (4), представим (3) в виде

$$\sqrt{n} = \frac{Z}{R}. \quad (5)$$

После подключения катушки индуктивности электрическая цепь содержит активное и индуктивное сопротивления. В этом случае полное сопротивление  $Z$  цепи переменного тока равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

где  $X_L = \omega L$  – реактивное сопротивление катушки индуктивности. Тогда

$$\sqrt{n} = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{R} \text{ или } R\sqrt{n-1} = \omega L. \quad (6)$$

Учитывая, что  $\omega = 2\pi\nu$ , решая уравнение (6) относительно  $L$ , найдем:

$$L = \sqrt{n-1} \cdot \frac{R}{2\pi\nu} \approx 0,16 \text{ Гн.}$$

**6.13. Переменный ток.** Через катушку индуктивности с коэффициентом самоиндукции  $L$  течет переменный ток, частота которого  $\nu = 200$  Гц. Какой будет частота  $\nu_x$  (в герцах) изменения энергии магнитного поля катушки индуктивности, если индуктивность катушки и частоту тока увеличить в 2 раза?

Дано:  $\nu = 200$  Гц.

Определить  $\nu_x$ .

**Решение.** Энергия магнитного поля тока определяется формулой

$$W_L = \frac{LI^2}{2}, \quad (1)$$

где  $L$  – индуктивность катушки.

Циклическая частота  $\omega$  колебаний связана с частотой  $\nu$  колебаний соотношением

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (2)$$

Пусть ток изменяется по закону

$$I = I_m \sin(\omega t) = I_m \sin(2\pi\nu t). \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим

$$W_L = \frac{LI_m^2 \sin^2(2\pi\nu t)}{2}. \quad (4)$$

Из тригонометрии известно, что

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2}. \quad (5)$$

Тогда

$$\sin^2(2\pi\nu t) = \frac{1 - \cos(4\pi\nu t)}{2}.$$

Подставив (6) в (4), приведем уравнение (4) в виде

$$W_L = \frac{LI_m^2 (1 - \cos(4\pi\nu t))}{4} = \frac{LI_m^2 (1 - \cos(2\pi\nu_x t))}{4}.$$

Индуктивность  $L$  катушки индуктивности от частоты переменного тока не зависит. Если частоту тока не изменять, то частота  $\nu_x$  изменения энергии магнитного поля катушки индуктивности, согласно уравнению (7), будет равна  $4\pi\nu = 2\pi\nu_x$  или  $\nu_x = 2\nu$ , т.е. частота изменения энергии магнитного поля в два раза больше, чем частота тока ( $\nu_x = 400$  Гц). Если частоту тока дополнительно увеличить в 2 раза, то тогда частота изменения энергии магнитного поля  $\nu_x = 2 \cdot 2\nu = 4\nu = 800$  Гц.

Альтернативное (графическое) решение. Индуктивность  $L$  катушки от частоты не зависит, то есть  $L(\nu) = \text{const}$ . Энергия магнитного поля тока частотой  $\nu$  выражается формулой

$$W(\nu_x) = \frac{L}{2} \cdot I^2(\nu),$$

где  $\nu_x$  – частота изменения энергии магнитного поля. Если принять  $L = 4$  Гн,  $I_m = 1$  А, зависимости тока  $I(t)$  и энергии  $W(t)$  от времени примут вид, представленный на рис. 6.7.

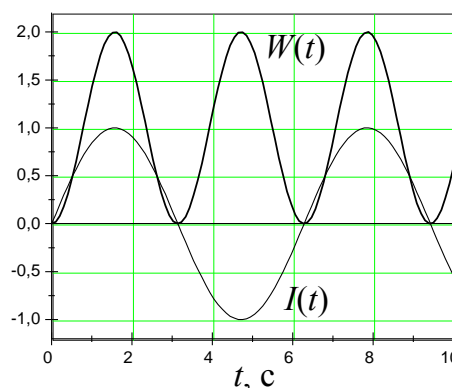


Рис. 6.7

Из рисунка видно, что  $\nu_x = 2\nu$ . Поэтому при  $\nu = 2\nu$   $\nu_x = 4\nu$ , то есть частота изменения  $\nu_x$  энергии магнитного поля катушки индуктивности увеличится в четыре раза при увеличении частоты  $\nu$  тока в два раза, т.е.  $\nu_x = 2 \cdot 2\nu = 4\nu = 800$  Гц.

**6.14. Электромагнитные волны.** Определите модуль скорость изменения тока  $|dI/dt|$  в катушке индуктивности, в которой возникает ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$ , равная по модулю 0,06 мВ, если длина радиоволны  $\lambda$ , излучаемая генератором, колебательный контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкостью  $C = 25$  нФ, равна 500 м. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых.

Дано:  $|\mathcal{E}_{si}| = 0,06$  мВ,  $\lambda = 500$  м,  $C = 25$  нФ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Определить  $|dI/dt|$ .

**Решение.** Модуль ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке индуктивности при изменении тока, связан с модулем скорости изменения тока соотношением

$$|\mathcal{E}_{si}| = L \left| \frac{dI}{dt} \right|. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что



$$\left| \frac{dI}{dt} \right| = \frac{|\mathcal{E}_{si}|}{L}. \quad (2)$$

Длина волны, излучаемая генератором,

$$\lambda = cT, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме,  $T$  – период электромагнитных колебаний.

Период электромагнитных колебаний определяется формулой Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) имеем

$$L = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 c^2 C}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (2) и решая получившееся уравнение относительно  $|dI/dt|$ , найдем:

$$\left| \frac{dI}{dt} \right| = \left( \frac{2\pi c}{\lambda} \right)^2 C |\mathcal{E}_{si}| \approx 21,3 \text{ A/c}.$$

**6.15\*.** Чашка пружинных весов массой  $m_1 = 1$  кг совершает вертикальные гармонические колебания с амплитудой  $A = 1$  м и циклической частотой  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ . Когда чашка находилась в крайнем нижнем положении, на нее поместили дополнительный груз массой  $m_2$ . В результате колебания прекратились. Определите массу  $m_2$  дополнительного груза. Ответ представить в единицах СИ.

Д а н о :  $m_1 = 1$  кг;  $A = 1$  м;  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$ .

О п р е д е л и т ь  $m_2$ .

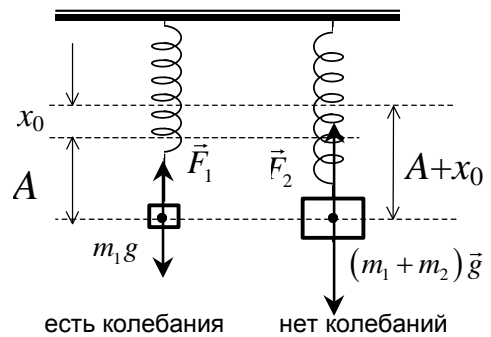
**Решение.** Колебания чашки массой  $m_1$  происходят относительно положения равновесия (рис. 6.8):

$$m_1 g = kx_0, \quad (1)$$

где  $k$  – жесткость пружины;  $x_0$  – удлинение пружины под действием силы тяжести  $m_1 \vec{g}$ .

Циклическая частота колебаний

$$\omega = \sqrt{k/m_1}. \quad (2)$$



В крайнем нижнем положении на чашку весов со стороны пружины действует сила упругости  $\vec{F}_2$ , равная  $k(x_0 + A)$  по закону Гука, которая уравнивается силой тяжести  $(m_1 + m_2)\vec{g}$ , и колебания прекращаются, то есть

$$k(x_0 + A) = (m_1 + m_2)g. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) получим

$$kA = m_2g. \quad (4)$$

Выразим из уравнения (2)  $k = m_1\omega^2$  и подставим в (4):

$$m_1A\omega^2 = m_2g. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5) относительно  $m_2$ , найдем:

$$m_2 = m_1A\omega^2/g = 2,5 \text{ кг.}$$

### Задачи для самостоятельного решения

#### 6.1.

**6.1.1.** Колебательный процесс происходит по синусоидальному закону и приведен на рис. 6.9. Чему равна разность фаз (в радианах) колебаний в начальный момент времени и в момент времени, равный 5 с? [ $5\pi$ ]

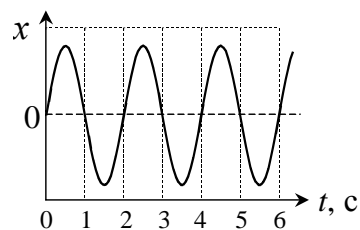


Рис. 6.9

**6.1.2.** На рис. 6.10 представлены графики гармонических колебаний двух математических маятников (1 и 2) различной длины. У какого маятника (1 или 2) длина больше? Ответ обоснуйте. [1]

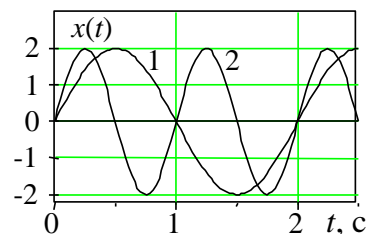


Рис. 6.10

**6.1.3.** Чему равен сдвиг фаз (в радианах) между ускорением и скоростью материальной точки, совершающей гармонические колебания? Ответ обоснуйте. [ $\pi/2$ ]

**6.1.4.** Чему равен сдвиг фаз (в радианах) между ускорением и смещением от положения равновесия материальной точки, совершающей гармонические колебания. Ответ обоснуйте. [ $\pi$ ]

**6.1.5.** Получите формулу, по которой можно определить ускорение свободного падения, проводя опыты с математическим маятником.

- 6.1.6.** Как зависит период колебаний математического маятника от его массы. Ответ обоснуйте. [Не зависит]
- 6.1.7.** Даны два математических маятника одинаковой длины ( $l_1 = l_2$ ) и разной массы ( $m_2 > m_1$ ). Период колебаний какого маятника больше? Ответ обоснуйте. [Периоды одинаковы]
- 6.1.8.** Одинаковые по размеру свинцовый и алюминиевый шарики подвешены на длинных нитях равной длины. Будут ли одинаковы периоды их колебаний? Ответ обоснуйте. [Будут одинаковы]
- 6.1.9.** За какую часть периода  $T$  математический маятник проходит путь от левого крайнего положения до правого крайнего положения? Ответ обоснуйте. [ $T/2$ ]
- 6.1.10.** Во сколько раз увеличилась амплитуда колебаний пружинного маятника, если его полная механическая энергия увеличилась в 4 раза? Ответ обоснуйте. [2]
- 6.1.11.** Являются ли затухающие колебания периодическими? Ответ обоснуйте.
- 6.1.12.** Может ли звуковая волна распространяться в вакууме? Ответ обоснуйте. [Не может]
- 6.1.13.** Какая из величин изменяется при переходе звуковой волны из воздуха в воду: частота (1) или длина волны (2)? Ответ обоснуйте. [2]
- 6.1.14.** Какое число полувольт поперечной стоячей волны: целое (1) или полуцелое (2) укладывается на длине струны, закрепленной на обоих концах? Ответ обоснуйте. [1]
- 6.1.15.** Чему равно индуктивное сопротивление катушки индуктивности, включенной в сеть постоянного тока? Ответ обоснуйте. [0]
- 6.1.16.** Почему в цепи, содержащей конденсатор, может протекать только переменный ток? Ответ обоснуйте.
- 6.1.17.** При какой циклической частоте в цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные конденсатор емкостью  $C$ , катушку индуктивностью  $L$  и резистор с активным сопротивлением  $R$ , полное сопротивление цепи равно  $R$ ? Ответ обоснуйте. [ $1/\sqrt{LC}$ ]

**6.1.18.** Конденсатор, заряженный до энергии  $W_0$ , в первом случае подключили к катушке индуктивностью  $L$ , а во втором случае к катушке индуктивностью  $4L$ . В обоих случаях в контуре возникли незатухающие электромагнитные колебания. Каково отношение максимальных энергий магнитного поля катушек  $W_{m2}/W_{m1}$ ? Ответ обоснуйте. [1]

**6.1.19.** На приведенной схеме (рис. 6.11) ключ  $K$  в момент времени  $t = 0$  переводится из положения 1 в положение 2. Получите выражение для энергии колебательного контура в момент времени  $t = T/2$ , где  $T$  – период электромагнитных колебаний в контуре.

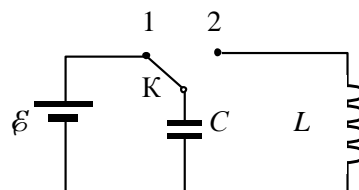


Рис. 6.11

**6.1.20.** Колебательный контур содержит катушку индуктивностью  $L$ , заряженный конденсатор емкостью  $C$  и ключ  $K$  (рис. 6.12). Через какое время после замыкания ключа  $K$  ток в контуре достигнет своего максимального значения? Ответ обоснуйте.  $[\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}]$

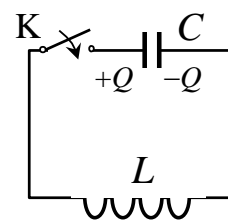


Рис. 6.12

**6.1.21.** Идеальная катушка индуктивностью  $L$  подключена к генератору переменного тока, напряжение на выходе которого изменяется по закону  $u = U_m \cos \omega t$ . Чему равно среднее значение мощности переменного тока в катушке индуктивности за период  $T$ ? Ответ обоснуйте. [0]

**6.1.22.** Конденсатор электроемкостью  $C$  подключен к генератору переменного тока, напряжение на выходе которого изменяется по закону  $u = U_m \cos \omega t$ . Чему равно среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период  $T$ ? Ответ обоснуйте. [0]

**6.1.23.** Какое свойство ионосферы позволяет осуществить радиосвязь центра управления с космическими кораблями: отражение волн (1), преломление волн (2), пропускание волн (3), поглощение волн (4)? Ответ обоснуйте. [3]

**6.1.24.** Изобразите графически линейно-поляризованную гармоническую волну. Колебания каких величин происходят в электромагнитной волне? Ответ обоснуйте.

**6.1.25.** Может ли электромагнитная волна распространяться в вакууме? Ответ обоснуйте. [Может]

## 6.2.

**6.2.1.** Напишите уравнение косинусоидальных гармонических колебаний материальной точки с начальной фазой колебания, равной 0. Получите выражение для скорости колебания. Постройте графики зависимостей смещения материальной точки от положения равновесия и скорости колебания от времени.

**6.2.2.** Уравнение колебаний материальной точки имеет вид:  $x = 0,05 \cdot \sin(10\pi t + \pi/4)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Постройте график зависимости смещения  $x(t)$  материальной точки от положения равновесия в зависимости от времени.

**6.2.3.** Колебания материальной точки совершаются по закону:  $x = 0,1 \cdot \cos(2\pi t + \pi/2)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Постройте график зависимости ускорения  $a(t)$  материальной точки от времени.

**6.2.4.** Напишите формулу для периода колебаний математического маятника. Постройте график зависимости периода колебаний математического маятника от длины нити при  $g = \text{const}$ .

**6.2.5.** Напишите формулу для кинетической энергии математического маятника. Постройте график зависимости кинетической энергии маятника от квадрата скорости его движения.

**6.2.6.** Шарик совершает синусоидальные колебания с амплитудой 0,1 м и периодом  $T$ . В начальный момент времени ( $t = 0$ ) шарик находится в положении равновесия. Найдите смещение (в единицах СИ) шарика от положения равновесия в моменты времени  $T/12$ ,  $T/8$ ,  $T/6$ ,  $T/4$ . Постройте график зависимости смещения шарика от положения равновесия в зависимости от времени. [0,05; 0,071; 0,087; 0,1]

**6.2.7.** Напишите формулу, связывающую потенциальную энергию пружинного маятника со смещением от положения равновесия. Постройте график этой зависимости.

**6.2.8.** Напишите формулу для полной энергии гармонического колебания. Постройте график зависимости полной энергии гармонического колебания от амплитуды колебаний.

**6.2.9.** Напишите формулу для энергии гармонического колебания. Постройте график зависимости полной энергии гармонического колебания от времени.

**6.2.10.** Напишите уравнение гармонической линейно-поляризованной волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $Ox$ . Получите выражение для разности фаз колебаний точек среды в зависимости от длины волны и постройте график зависимости разности фаз от длины волны.

**6.2.11.** Какое явление называется резонансом в механической колебательной системе? Постройте график зависимости амплитуды вынужденных колебаний от циклической частоты вынуждающей силы. Укажите на графике собственную циклическую частоту колебательной системы.

**6.2.12.** Напишите формулу Томсона для периода гармонических колебаний в колебательном контуре. Постройте график зависимости периода  $T$  колебаний от индуктивности  $L$  колебательного контура. Емкость  $C$  конденсатора считать постоянной.

**6.2.13.** Напишите формулу для циклической частоты собственных колебаний в колебательном контуре. Постройте график зависимости циклической частоты от емкости  $C$  переменного конденсатора колебательного контура. Индуктивность  $L$  считать постоянной.

**6.2.14.** Колебания заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре происходят по закону  $q = q_m \sin \omega t$ . Получите выражение для колебаний силы тока в контуре. Постройте графики зависимостей заряда на обкладках конденсатора и силы тока в контуре от времени.

**6.2.15.** Колебания заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре происходят по закону  $q = q_m \cos \omega t$ . Получите выражение для колебаний напряжения на конденсаторе. Постройте графики зависимостей заряда на обкладках конденсатора и напряжения на конденсаторе от времени.

**6.2.16.** Напишите формулу для индуктивного сопротивления катушки индуктивности. Постройте график зависимости величины индуктивного сопротивления от частоты.

**6.2.17.** Напишите формулу для емкостного сопротивления конденсатора. Постройте график зависимости величины емкостного сопротивления от частоты.

**6.2.18.** Постройте график зависимости амплитуды колебаний тока от частоты переменного напряжения, приложенного к колебательному

контур. Как изменится резонансная частота контура при увеличении расстояния между обкладками конденсатора при неизменной индуктивности контура? Ответ обоснуйте. [Увеличится]

**6.2.19.** Напишите формулу для мгновенной мощности переменного тока в цепи с резистором. Постройте график зависимости величины мгновенной мощности от времени.

**6.2.20.** Электрическая цепь, состоящая из катушки с индуктивностью  $L$ , обладающей активным сопротивлением  $R$ , подключена к источнику переменного тока с циклической частотой  $\omega$ , амплитуда напряжения которого  $U_m$ . Чему равна амплитуда  $I_m$  вынужденных колебаний силы тока в электрической цепи? Изобразите на векторной диаграмме векторы, соответствующие колебаниям силы тока  $I_m$  и напряжений  $U_{Lm}$  и  $U_{Rm}$  на элементах контура  $L$  и  $R$ .

**6.2.21.** Электрическая цепь, состоящая из конденсатора электроемкостью  $C$  и резистора с активным сопротивлением  $R$ , подключена к источнику переменного тока с циклической частотой  $\omega$ , амплитуда напряжения которого  $U_m$ . Чему равна амплитуда  $I_m$  вынужденных колебаний силы тока в электрической цепи? Изобразите на векторной диаграмме векторы, соответствующие колебаниям силы тока  $I_m$  и напряжений  $U_{Cm}$  и  $U_{Rm}$  на элементах контура  $C$  и  $R$ .

**6.2.22.** Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью  $L$ , обладающей активным сопротивлением  $R$ , и конденсатора электроемкостью  $C$ , подключен к источнику переменного тока с циклической частотой  $\omega$ , амплитуда напряжения которого  $U_m$ . Чему равна амплитуда  $I_m$  вынужденных колебаний силы тока в контуре? Изобразите на векторной диаграмме векторы, соответствующие колебаниям силы тока  $I_m$  и напряжений  $U_{Lm}$ ,  $U_{Cm}$  и  $U_{Rm}$  на элементах контура  $L$ ,  $C$  и  $R$ .

**6.2.23.** Как интенсивность электромагнитной волны, излучаемой точечным источником, зависит от расстояния от источника? Постройте график зависимости интенсивности излучения точечного источника электромагнитных волн от расстояния от источника.

**6.2.24.** Как интенсивность электромагнитной волны, излучаемой точечным источником, зависит от ее частоты? Постройте график зависимости интенсивности электромагнитной волны, излучаемой точечным источником, от ее частоты. Объясните, почему энергетически выгодно излучение электромагнитных волн больших частот.

**6.2.25.** Напишите формулу для объемной плотности энергии электромагнитного поля в вакууме и постройте график зависимости объемной плотности энергии электромагнитного поля от амплитуды напряженности электрического поля.

### 6.3.

**6.3.1.** По какой траектории будет продолжаться движение математического маятника, если его нить пережечь в тот момент, когда он проходит положение равновесия? Ответ обоснуйте. [Парабола]

**6.3.2.** Сколько раз за один период колебаний груза на пружине потенциальная энергия пружины и кинетическая энергия груза принимают равные значения? Ответ обоснуйте. [4]

**6.3.3.** В каком случае: на экваторе (1) или на полюсе (2) маятниковые часы, точно выверенные для Томска, будут отставать? Ответ обоснуйте. [1]

**6.3.4.** Как изменится ход маятниковых часов, если их поместить на искусственный спутник Земли? Ответ обоснуйте. [Остановятся]

**6.3.5.** В каких точках (1, 2 или 3, рис. 6.13) тангенциальное ускорение математического маятника максимально? Ответ обоснуйте. [1]

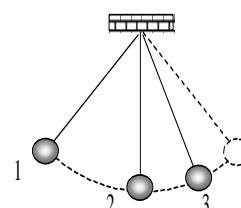


Рис. 6.13

**6.3.6.** Груз колеблется по вертикали на резиновом шнуре. Во сколько раз изменится период вертикальных колебаний груза, если его подвесить на том же шнуре, сложенным вдвое? Ответ обоснуйте. [2]

**6.3.7.** В каких средах: газообразной (1), жидкой (2) или твердой (3) могут распространяться поперечные упругие волны? Ответ обоснуйте. [3]

**6.3.8.** На рис. 6.14 приведена «мгновенная фотография» участка струны, по которой в направлении оси  $x$  распространяется поперечная бегущая волна. В каком направлении: вверх (1) или вниз (2) в следующий момент времени сместится частица струны, соответствующая точке А? Ответ обоснуйте. [1]

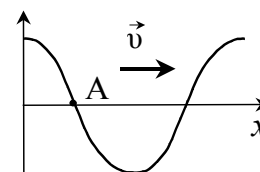


Рис. 6.14



**6.3.9.** На рис. 6.15 приведена «мгновенная фотография» участка струны, по которой в направлении оси  $x$  распространяется поперечная бегущая волна. В каком направлении: вверх (1), вниз (2), вправо (3) или влево (4) в данный момент времени движется точка  $C$ ? Ответ обоснуйте. [2]

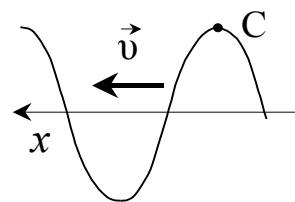


Рис. 6.15

**6.3.10.** Всегда ли справедливо выражение: «как аукнется, так и откликнется», то есть всегда ли отраженный звук имеет ту же высоту тона, что и падающий?

**6.3.11.** Колебательный контур, состоящий из последовательно включенных: катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора емкостью  $C$  и активного сопротивления  $R$ , подключен к источнику переменного напряжения, которое изменяется по закону  $U(t) = U_m \cos \omega t$ . Чему равна резонансная частота? Чему равна амплитуда силы тока при резонансе? Ответ обоснуйте.  $[\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \frac{U_m}{R}]$

**6.3.12.** Как повлияет на период электромагнитных колебаний колебательного контура введение сердечника из ферромагнитного материала внутрь катушки? Ответ обоснуйте. [Период увеличится]

**6.3.13.** Катушка индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R$  подключается сначала к источнику постоянного тока (1), а затем к источнику переменного тока (2) частоты  $\nu$ . В каком случае (1 или 2) сопротивление катушки больше? Ответ обоснуйте. [2]

**6.3.14.** В осветительную цепь последовательно включены электрическая лампочка и конденсатор. Как изменится сила тока в лампочке при подключении еще одного конденсатора параллельно первому? Ответ обоснуйте. [Увеличится]

**6.3.15.** Через катушку индуктивностью  $L$  течет переменный ток частотой  $\nu$ . Какой будет частота колебаний энергии магнитного поля катушки индуктивности, если индуктивность катушки и частоту тока увеличить в 2 раза? Ответ обоснуйте. [ $2\nu$ ]

**6.3.16.** Катушка квартирного электрического звонка с железным сердечником подключена к переменному току бытовой электросети частотой 50 Гц (рис. 6.16). Найдите частоту колебаний якоря. Ответ представьте в единицах СИ. [100]

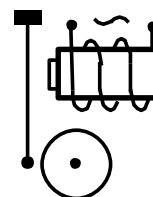


Рис. 6.16

**6.3.17.** Первичная обмотка трансформатора подключена к источнику постоянного напряжения. Покажет ли в стационарном режиме наличие напряжения подключенный к вторичной обмотке вольтметр? Ответ обоснуйте. [Не покажет]

**6.3.18.** Как изменится (увеличится или уменьшится) сила тока в первичной обмотке трансформатора при его переключении с режима холостого хода на рабочий режим? Ответ обоснуйте. [Увеличится]

**6.3.19.** В каком случае (1 или 2, рис. 6.17) трансформатор потребляет большее количество энергии? Ответ обоснуйте. [2]

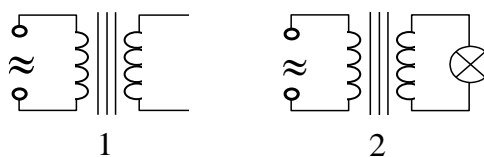


Рис. 6.17

**6.3.20.** Почему при передаче электроэнергии применяют высокое напряжение? Ответ обоснуйте.

**6.3.21.** Изменится ли направление распространения электромагнитной волны, если в волне, не изменяя направления вектора напряженности электрического поля, изменить на противоположное направление вектора магнитной индукции поля? Ответ обоснуйте. [Изменится]

**6.3.22.** Можно ли выбрать систему отсчета, в которой бы обнаруживалась только электрическая составляющая  $\vec{E}$  электромагнитной волны? Ответ обоснуйте. [Можно]

**6.3.23.** Параллельно какой координатной оси распространяется плоская электромагнитная волна, если в некоторый момент времени в точке с координатами  $(x, y, z)$  напряженность электрического поля  $\vec{E} = \vec{E}(E, 0, 0)$ , а индукция магнитного поля  $\vec{B} = \vec{B}(0, 0, B)$ ? Ответ обоснуйте. [Oy]

**6.3.24.** Во сколько раз при увеличении дальности радиолокации в два раза требуется увеличить мощность передатчика? Излучатель радиоволн считать точечным. Ответ обоснуйте. [16]

**6.3.25.** Во сколько раз при увеличении дальности радиосвязи с космическим кораблем в два раза требуется увеличить мощность передатчика? Излучатель радиоволн считать точечным. Ответ обоснуйте. [4]

## 6.4.

**6.4.1.** Определите амплитуду косинусоидального гармонического колебания, если для фазы  $60^\circ$  смещение частицы от положения равновесия равно 2 м. Ответ представьте в единицах СИ. [4]

**6.4.2.** Чему равна фаза гармонического колебания для момента времени  $t = T/2$ ? Начальная фаза колебания равна  $180^\circ$ . Ответ представьте в радианах и округлите до сотых. [6,28]

**6.4.3.** Математический маятник, длина нити которого 0,1 м, совершает гармонические колебания с амплитудой 0,5 см. Найдите максимальное значение скорости маятника. Ответ представьте в см/с. [5]

**6.4.4.** Маятник массой 25 г отклонили от положения равновесия, при этом сила упругости нити равна 0,2 Н. Найдите силу, возвращающую маятник в положение равновесия. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,15]

**6.4.5.** Пружина под действием подвешенного к ней груза растянулась на 6,4 см. Если груз оттянуть вниз, а затем отпустить, то он начнет колебаться вдоль вертикальной линии. Определите период колебаний груза. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,5]

**6.4.6.** Шарик массой 0,25 кг, подвешенный на пружине, совершает 10 колебаний за 3,14 с. Определите жесткость пружины. Ответ представьте в единицах СИ. [100]

**6.4.7.** Груз, подвешенный на пружине жесткостью 1 кН/м, колеблется с амплитудой 2 см. Чему равна максимальная кинетическая энергия этого груза? Ответ представьте в единицах СИ. [0,2]

**6.4.8.** При какой скорости движения поезда амплитуда вертикальных колебаний вагона будет наибольшей, если период собственных колебаний вагона 0,7 с, а длина одного рельса 14 м? Ответ представьте в единицах СИ. [20]

**6.4.9.** Звуковая волна с частотой колебаний 1 кГц распространяется в стальном стержне со скоростью 5 км/с. Определите расстояние между ближайшими точками, колебания в которых отличаются по фазе на  $\pi$ . Ответ представьте в единицах СИ. [2,5]

**6.4.10.** Определите (в градусах) разность фаз колебаний частиц, расположенных на расстоянии 1 м вдоль направления распространения волны. Скорость распространения волны равна 500 м/с. Частота колебаний 100 Гц. [72]

**6.4.11.** По спокойной водной поверхности распространяется волна, расстояние между соседними гребнями которой 1,6 м, период колебаний 0,8 с. Сколько времени понадобится этой волне, чтобы пройти расстояние 20 м? Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**6.4.12.** Найдите отношение интенсивностей звуковой и ультразвуковой волн, распространяющихся в воде со скоростью 1450 м/с, если амплитуды колебаний одинаковы, а длины волн соответственно равны 2,9 м и 1,45 см. [ $2,5 \cdot 10^{-5}$ ]

**6.4.13.** Каково минимальное расстояние между узлами стоячей волны при скорости звука 340 м/с и частоте колебаний 680 Гц? Ответ представьте в единицах СИ. [0,25]

**6.4.14.** Стальную деталь проверяют ультразвуковым дефектоскопом, работающим на частоте 1 МГц. Отраженный от дефекта сигнал возвратился на поверхность детали через 8 мкс. На какой глубине находится дефект, если длина ультразвуковой волны в стали равна 5 мм? Ответ представьте в миллиметрах. [20]

**6.4.15.** Колебания, происходящие с частотой  $\nu$ , имеют в первой среде длину волны  $\lambda$ , а во второй  $4\lambda$ . Найдите отношение скоростей распространения волн в первой и второй средах. [0,25]

**6.4.16.** Колебания электрического заряда в колебательном контуре происходят по закону  $q = 10 \cos(20\pi t)$  Кл, где  $t$  – в секундах. Найдите период колебаний. Ответ представьте в единицах СИ. [0,1]

**6.4.17.** На конденсаторе, включенном в колебательный контур, амплитуда напряжения 1000 В. Емкость конденсатора 10 пФ. Найдите максимальную энергию магнитного поля катушки индуктивности. Ответ представьте в микроджоулях. [5]

**6.4.18.** При индуктивности колебательного контура 100 мкГн частота свободных электрических колебаний в контуре равна 2 МГц. Какой должна быть индуктивность контура при неизменной емкости, чтобы частота колебаний в контуре стала равной 4 МГц? Ответ представьте в единицах СИ. [ $2,5 \cdot 10^{-5}$ ]

**6.4.19.** Мгновенное значение ЭДС переменного тока дано выражением  $\mathcal{E} = 100 \sin(800\pi t)$ , где  $t$  – в секундах,  $\mathcal{E}$  – в вольтах. Чему равно значение ЭДС в момент времени  $T/2$ , где  $T$  – период колебаний? [0]

**6.4.20.** Мгновенное значение ЭДС переменного тока дано выражением  $\mathcal{E} = 100 \sin(800\pi t)$ , где  $t$  – в секундах,  $\mathcal{E}$  – в вольтах. Найдите действующее значение ЭДС. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [71]

**6.4.21.** Колебательный контур включен в сеть переменного напряжения. Действующее значение напряжения на конденсаторе, катушке индуктивности и на резисторе соответственно равны 100 В, 60 В и 30 В. Найдите действующее значение напряжения сети. Ответ представьте в единицах СИ. [50]

**6.4.22.** К катушке приложено напряжение, изменяющееся в зависимости от времени по закону  $u = 311 \cos(100\pi t)$ . В. Найдите индуктивность катушки, если действующее значение силы тока, протекающего через нее, равно 7 А. Ответ представьте в единицах СИ. [0,1]

**6.4.23.** Ток в первичной обмотке трансформатора 0,5 А, напряжение на ее концах 220 В. Ток во вторичной обмотке 11 А, напряжение на ее концах 9,5 В. Определите коэффициент полезного действия трансформатора. Ответ представьте в процентах. [95]

**6.4.24.** На расстоянии 300 м от Останкинской телебашни плотность потока излучения равна  $40 \text{ мВт/м}^2$ . Какова плотность потока излучения на расстоянии уверенного приема, равного 120 км? Ответ представьте в  $\text{мкВт/м}^2$ . [0,25]

**6.4.25.** Плотность потока излучения электромагнитной волны равна  $6 \text{ мВт/м}^2$ . Найдите объемную плотность энергии электромагнитной волны. Ответ представьте в единицах СИ. [ $2 \cdot 10^{-11}$ ]

## 6.5.

**6.5.1.** Уравнение колебаний материальной точки имеет вид:  $x = 0,05 \cdot \sin(10\pi t + \pi/4)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Найдите смещение точки от положения равновесия и амплитуду скорости в момент  $t = T/4$ . Ответы представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,04; 1,57]

**6.5.2.** Материальная точка совершает колебания по закону  $x = 0,02 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Найдите смещение точки от положения равновесия в момент  $t = T/4$  и амплитуду ускорения. Ответы представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,02; 0,05]

**6.5.3.** Колебательное движение математического маятника описывается уравнением  $x = 0,006 \cdot \cos(2\pi t)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Определите длину этого маятника. Ответ представьте в единицах СИ. [0,25]

**6.5.4.** Через какой промежуток времени после начала синусоидальных колебаний смещение точки от положения равновесия будет равно половине амплитуды, если период колебаний равен 24 с, а начальная фаза равна нулю? Ответ представьте в единицах СИ. [2]

**6.5.5.** Наибольшее смещение и наибольшая скорость материальной точки, совершающей гармоническое колебание, равны, соответственно, 4 м и 10 м/с. Определите амплитуду ускорения материальной точки. Ответ представьте в единицах СИ. [25]

**6.5.6.** Чему равна возвращающая сила, действующая на математический маятник массой 10 кг при угле отклонения  $30^\circ$ ? Ответ представьте в единицах СИ. [50]

**6.5.7.** Один конец пружины жесткостью 49 Н/м закреплен, на другом конце висит груз массой 1 кг. Определите частоту колебаний такого маятника. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,1]

**6.5.8.** Шарик массой 0,1 кг совершает гармонические колебания на невесомой пружине. Определите период колебаний шарика, если для упругого удлинения пружины на 1 см требуется сила 0,1 Н. Ответ представьте в единицах СИ. [0,628]

**6.5.9.** Груз массой 200 г, подвешенный на пружине, колеблется с той же частотой, что и математический маятник длиной 0,2 м. Определите жесткость пружины. Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**6.5.10.** Тело массы 5 кг совершает гармонические колебания по закону:  $x = 0,8 \sin(\pi t + \pi/2)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. Определите энергию колеблющегося тела. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [15,8]

**6.5.11.** Шарик, прикрепленный к пружине, совершает гармонические колебания на гладкой горизонтальной плоскости с амплитудой 10 см. На какое расстояние сместится шарик от положения равновесия за время, в течение которого его кинетическая энергия уменьшится вдвое? Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. [7]

**6.5.12.** Найдите частоту звуковых колебаний в стали, если расстояние между ближайшими точками волны, отличающимися по фазе на  $\pi/2$ , составляет 1 м. Ответ представьте в единицах СИ. [1250]

**6.5.13.** Точки, находящиеся на одном луче и удаленные от источника колебаний на 12 м и 14,7 м, колеблются с разностью фаз  $3\pi/2$ . Определите скорость распространения колебаний в данной среде, если период колебаний источника  $10^{-3}$  с. Ответ представьте в единицах СИ. [3600]

**6.5.14.** В колебательном контуре емкость конденсатора 2 мкФ, а максимальное напряжение на нем 5 В. Чему равна энергия магнитного поля катушки индуктивности в момент времени, когда напряжение на конденсаторе равно 3 В? Ответ представьте в микроджоулях. [16]

**6.5.15.** Максимальный заряд на обкладках конденсатора 1 мкКл, амплитуда силы тока 1 мА. Найдите период колебаний. Ответ представьте в миллисекундах. [6,28]

**6.5.16.** Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и двух одинаковых конденсаторов, включенных параллельно. Период колебаний в контуре 20 мкс. Чему будет равен период колебаний в контуре, если конденсаторы включить последовательно? Ответ представьте в микросекундах. [10]

**6.5.17.** Изменение заряда конденсатора идеального колебательного контура происходит по закону  $q = 10^{-3} \cdot \sin(100\pi t)$  Кл. Чему равна максимальная энергия электрического поля конденсатора, если его емкость 10 мкФ? Ответ представьте в единицах СИ. [0,05]

**6.5.18.** После того как конденсатору колебательного контура был сообщен заряд  $10^{-6}$  Кл, в контуре происходят затухающие электромагнитные колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому моменту времени, когда колебания полностью затухнут? Емкость конденсатора 0,01 мкФ. Ответ представьте в мкДж. [50]

**6.5.19.** Определите резонансную частоту колебательного контура, если максимальный заряд на конденсаторе равен 1 мкКл, а максимальный ток в контуре равен 10 А. Ответ представьте в мегагерцах и округлите до десятых. [1,6]

**6.5.20.** При увеличении напряжения на конденсаторе колебательного контура на 20 В амплитуда силы тока увеличилась в 2 раза. Найдите начальное напряжение. Ответ представьте в единицах СИ. [20]

**6.5.21.** Электрическая цепь состоит из конденсатора с емкостным сопротивлением, равным 2,5 кОм, и катушки индуктивности с индуктивным сопротивлением 2 кОм. Найдите полное сопротивление цепи. Ответ представьте в единицах СИ. [1500]

**6.5.22.** К генератору переменного тока с частотой 100 Гц последовательно подключены катушка индуктивностью 0,5 Гн, конденсатор емкостью 4 мкФ и резистор сопротивлением 54 Ом. Амплитуда силы тока в цепи 0,5 А. Найдите амплитуду напряжения на генераторе. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [50]

**6.5.23.** Трансформатор, с коэффициентом трансформации 10, понижает напряжение с 10 кВ до 980 В. При этом сила тока во вторичной обмотке равна 2 А. Определите сопротивление вторичной обмотки. Потери энергии в первичной обмотке не учитывать. Ответ представьте в единицах СИ. [10]

**6.5.24.** Электромагнитные волны распространяются в некоторой однородной среде со скоростью  $2 \cdot 10^8$  м/с. Какую длину волны имеют электромагнитные колебания в этой среде, если их частота в вакууме 1 МГц? Ответ представьте в единицах СИ. [200]

**6.5.25.** Радиолокатор работает на волне длиной 15 см и дает 4000 импульсов в 1 с. Длительность каждого импульса 2 мкс. Сколько колебаний содержится в каждом импульсе и какова глубина разведки (в км) локатора? [4000; 37,5]



## 6.6

**6.6.1.** Путь, равный амплитуде, совершающая гармонические колебания точка проходит от положения равновесия за четверть периода. Найдите отношение путей, которые проходит точка за первую и вторую половины этого времени. Начальная фаза колебания равна нулю. Ответ округлите до десятых. [2,4]

**6.6.2.** Материальная точка совершает колебания по закону  $x = A \cdot \sin(\omega t)$ , где  $x$  – в метрах,  $t$  – в секундах. При фазе  $\pi/6$  смещение точки от положения равновесия равно 1 см. Чему равно смещение точки от положения равновесия при фазе  $\pi/2$ ? Ответ представьте в единицах СИ. [0,02]

**6.6.3.** Материальная точка массой 20 г совершает гармонические колебания. Найдите ускорение точки в момент времени, когда её смещение от положения равновесия равно 6 см. Начальная фаза колебаний равна нулю. Жесткость пружины равна 0,18 Н/м. Ответ представьте в единицах СИ. [0,54]

**6.6.4.** Два математических маятника имеют периоды колебаний 3 с и 4 с. Найдите период колебаний математического маятника, длина которого равна сумме длин указанных маятников. Ответ представьте в единицах СИ. [5]

**6.6.5.** Если увеличить массу груза, подвешенного к спиральной пружине, на 600 г, то период колебаний груза возрастает в 2 раза. Определите массу первоначально подвешенного груза. Ответ представьте в единицах СИ. [0,2]

**6.6.6.** Материальная точка массой 10 г, подвешенная на пружине жесткостью 9 Н/м, совершает гармонические косинусоидальные колебания с амплитудой 10 см. Найдите кинетическую энергию точки в момент времени, когда смещение точки от положения равновесия равно 8 см. Ответ представьте в миллиджоулях. [16,2]

**6.6.7.** Под действием периодической силы материальная точка массой 10 г совершает гармонические колебания с периодом 0,2 с и амплитудой 4 см. Найдите наибольшее значение силы в процессе колебаний. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,4]

**6.6.8.** От груза, висящего на пружине, жесткость которой равна 50 Н/м, отрывается масса в 50 г. Найдите амплитуду колебаний оставшейся части груза. Ответ представьте в сантиметрах. [1]

- 6.6.9.** Во сколько раз увеличится полная механическая энергия математического маятника при уменьшении его длины в 4 раза и увеличении амплитуды колебаний в 3 раза? [36]
- 6.6.10.** При растяжении пружины на 2 см совершается работа 2 Дж. Какую работу нужно совершить, чтобы растянуть пружину еще на 4 см? Ответ представьте в единицах СИ. [16]
- 6.6.11.** В некоторой среде распространяется волна. За время, в течение которого частица среды совершает 150 колебаний, волна распространяется на 110 м. Найдите длину волны, Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,7]
- 6.6.12.** Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 0,2 мГн и конденсатора емкостью 450 пФ. На какую длину волны настроен контур? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [565,2]
- 6.6.13.** Рамка площадью  $300 \text{ см}^2$  имеет 200 витков и вращается в магнитном поле с индукцией  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Тл. Найдите период вращения, если максимальная ЭДС индукции 14,4 В. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,04]
- 6.6.14.** Уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре имеет вид  $U = U_0 \cos(10^4 \pi t)$  В. Емкость конденсатора 0,1 мкФ. Определите индуктивность контура. Ответ представьте в миллигенри и округлите до целого числа. [10]
- 6.6.15.** Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне длиной 30 м в течение одного периода звукового колебания с частотой 20 кГц? [500]
- 6.6.16.** При изменении силы тока в катушке индуктивности на величину 1 А за время 0,6 с в ней возникает ЭДС самоиндукции 0,2 мВ. Какую длину волны излучает генератор, колебательный контур которого состоит из этой катушки индуктивности и конденсатора емкостью 14,1 нФ? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [2451]
- 6.6.17.** Мгновенное значение силы синусоидального тока через  $1/3$  периода равно 2,6 А. Какой будет сила тока при фазе  $1,5\pi$ ? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [-3]

**6.6.18.** Повышающий трансформатор состоит из двух обмоток, навитых на железное кольцо. Напряжение на первичной обмотке 120 В. Коэффициент трансформации 0,05. Определите число витков во вторичной обмотке, если вольтметр, присоединенный к проводу, продетому через железное кольцо, показывает 0,6 В. Ответ представьте в единицах СИ. [4000]

**6.6.19.** Вторичная обмотка трансформатора, имеющая 100 витков, пронизывается магнитным потоком, изменяющимся по закону  $\Phi = 0,01 \cdot \cos(314t)$ . Каково максимальное значение ЭДС самоиндукции в первичной обмотке, если в первичной обмотке 1000 витков? Ответ представьте в единицах СИ. [3140]

**6.6.20.** При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока на клеммах вторичной обмотки возникает напряжение 30 В. При включении в эту же сеть вторичной обмотки на клеммах первичной обмотки возникает напряжение 120 В. Во сколько раз число витков первичной обмотки больше числа витков вторичной обмотки трансформатора? [2]

**6.6.21.** Мощность трансформатора 132 Вт. Первичная обмотка содержит 60 витков и на нее подано напряжение, действующее значение которого 12 В. Сколько витков имеет вторичная обмотка, если по ней протекает ток, действующее значение которого 0,6 А? Потерями энергии пренебречь. [1100]

**6.6.22.** Через катушку индуктивностью  $L$  течет переменный ток, частота которого 50 Гц. Какой будет частота изменения энергии магнитного поля катушки, если индуктивность катушки уменьшить в 4 раза, а частоту тока в 4 раза увеличить? Ответ представьте в единицах СИ. [400]

**6.6.23.** В цепь переменного тока последовательно включены активное сопротивление 10 Ом и конденсатор. Амплитуда напряжения на конденсаторе 100 В, амплитуда напряжения на активном сопротивлении 90 В. Найдите емкость конденсатора, если циклическая частота колебаний тока  $300 \text{ с}^{-1}$ . Ответ представьте в микрофарадах. [300]

**6.6.24.** Электродпечь, сопротивление которой 22 Ом, питается от сети переменного тока. Определите количество теплоты, выделяемое печью за 1 ч, если сила тока в цепи изменяется по закону  $i = 20 \cdot \sin(20\pi t)$ , где  $i$  – в амперах,  $t$  – в секундах. Ответ представьте в мегаджоулях и округлите до десятых. [15,8]

**6.6.25.** Сила электрического тока изменяется по закону  $i = 0,564 \cdot \sin(12,56t)$ , где  $i$  – в амперах,  $t$  – в секундах. Какое количество теплоты выделится в проводнике с активным сопротивлением 15 Ом за время длительностью 10 периодов? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [11,9]

## 6.7.

**6.7.1.** Материальная точка массой 20 г, подвешенная на пружине жесткостью 12,5 Н/м, совершает гармонические синусоидальные колебания с амплитудой 10 см. Найдите модуль скорости точки в момент времени, когда смещение точки от положения равновесия равно 6 см. Ответ представьте в единицах СИ. [2]

**6.7.2.** Определите амплитуду гармонических колебаний материальной точки, если её полная энергия равна 0,04 Дж, а действующая на нее сила при смещении, равном половине амплитуды, равна 2 Н. Ответ представьте в единицах СИ. [0,02]

**6.7.3.** На какой угол отклонили математический маятник, состоящий из медного шарика диаметром 2 см, если на шарик в этом положении действует возвращающая сила 0,183 Н? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [30]

**6.7.4.** Тело массой 1 кг скользит по идеальному горизонтальному полу и растягивает пружину, с помощью которой он прикреплен к стене (рис. 6.18). Найдите наибольшее ускорение тела, если при нерастянутой пружине его скорость равна 2 м/с. Жесткость пружины 0,25 Н/м. Ответ представьте в единицах СИ. [1]

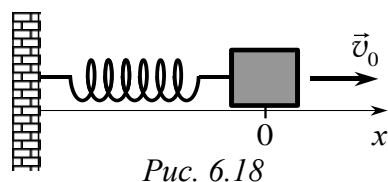


Рис. 6.18

**6.7.5.** За некоторое время маятник совершил 120 колебаний. Когда длину маятника увеличили на 70 см, маятник за то же время совершил 60 колебаний. Найдите конечную длину маятника. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,93]

**6.7.6.** Шарик массой 1 кг свободно падает с высоты 1 м на вертикально расположенную пружину, сжимающуюся на величину 10 см под действием удара шарика. Определите жесткость пружины. Ответ представьте в единицах СИ. [2200]

**6.7.7.** Горизонтальная плита совершает колебания в вертикальном направлении с амплитудой 0,5 м. Каким может быть наименьший период колебаний, чтобы лежащий на плите предмет не отделялся от нее? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,4]

**6.7.8.** На горизонтальной плите лежит груз. Плита движется вниз-вверх, совершая гармонические колебания с частотой  $1 \text{ с}^{-1}$ . Найдите минимальную амплитуду, при которой груз оторвется от плоскости. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,25]

**6.7.9.** Платформа совершает гармонические колебания в горизонтальном направлении с частотой  $0,25 \text{ с}^{-1}$ . На платформе лежит груз, коэффициент трения которого о платформу равен 0,1. Какой может быть максимальная амплитуда колебания, чтобы груз не скользил по ней? Ответ представьте в единицах СИ. [0,4]

**6.7.10.** Подставка совершает гармонические колебания с периодом 5 с. Находящееся на подставке тело начинает по ней скользить, когда амплитуда колебаний достигает величины 0,6 м. Найдите коэффициент трения между телом и подставкой. Ответ округлите до десятых. [0,1]

**6.7.11.** Автомобиль массой 1,5 т при движении по ребристой дороге совершает гармонические колебания в вертикальном направлении с периодом 0,3 с и амплитудой 15 см. Определите максимальную силу давления, действующую на каждую из четырех рессор автомобиля. Ответ представьте в килоньютонах и округлите целого числа. [28]

**6.7.12.** Ареометр массой 0,2 кг плавает в жидкости. Если его погрузить немного в жидкость, а затем отпустить, то он начнет совершать колебания с периодом 3,4 с. Считая колебания ареометра гармоническими и незатухающими, найдите плотность жидкости, в которой он плавает. Радиус вертикальной цилиндрической трубки ареометра равен 5,0 мм. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [869]

**6.7.13.** Шарик массой 50 г подвешен на пружине с жесткостью 50 Н/м. Шарик поднимают до такого положения, при котором пружина не напряжена и отпускают без толчка. Пренебрегая трением и массой пружины, найдите амплитуду возникших колебаний. Ответ представьте в сантиметрах. [1]

**6.7.14.** Тело массой 5 кг совершает гармонические колебания с амплитудой 10 см. Максимальная кинетическая энергия колеблющегося тела равна 2,5 Дж. Найдите период колебаний. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,63]

**6.7.15.** На расстоянии 1088 м от наблюдателя ударяют молотком по стальному рельсу. Наблюдатель, приложив ухо к рельсу, услышал звук на 3 с раньше, чем он дошел до него по воздуху. Найдите скорость звука в стали. Ответ представьте в единицах СИ. [5440]

**6.7.16.** Смещение от положения равновесия точки среды, в которой распространяются синусоидальные колебания, находящейся на расстоянии 4 см от источника колебаний, через промежуток времени  $T/6$ , где  $T$  – период колебаний, равно половине амплитуды. Найдите длину волны. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,48]

**6.7.17.** Зависимость напряжения на обкладках конденсатора емкостью  $2,6 \cdot 10^{-2}$  мкФ в колебательном контуре изменяется по закону  $U(t) = 10 \cdot \cos(2 \cdot 10^3 \pi t)$ , где  $U$  – в вольтах,  $t$  – в секундах. Определите индуктивность катушки контура. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [1]

**6.7.18.** Максимальное напряжение в колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивностью 5 мкГн и конденсатора емкостью 13330 пФ, равно 1,2 В. Активным сопротивлением контура пренебречь. Определите максимальный магнитный поток, если число витков в катушке 28. Ответ представьте в нановеберах и округлите до целого числа. [11]

**6.7.19.** На какую длину волны настроен колебательный контур, если он состоит из катушки индуктивностью 2 мГн и плоского конденсатора? Расстояние между пластинами конденсатора 1 мм, площадь пластин  $80 \text{ см}^2$ , конденсатор заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 11. Ответ представьте в километрах и округлите до десятых. [2,4]

**6.7.20.** Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 30 мкГн и плоского конденсатора с площадью пластин  $100 \text{ см}^2$ . Расстояние между пластинами 0,1 мм. Чему равна диэлектрическая проницаемость среды между пластинами конденсатора, если контур резонирует на волну длиной 750 м? Ответ округлите до целого числа. [6]

**6.7.21.** Колебательный контур с конденсатором емкостью 1 мкФ настроен на частоту 400 Гц. Если параллельно этому конденсатору присоединить второй конденсатор, частота колебаний в контуре становится равной 200 Гц. Определите емкость второго конденсатора. Ответ представьте в микрофарадах. [3]

**6.7.22.** В колебательном контуре происходят свободные колебания. Найдите длину волны, на которую настроен контур, если максимальный заряд конденсатора равен  $1 \text{ мкКл}$ , а максимальный ток  $10 \text{ А}$ . Ответ представьте в единицах СИ. [188,4]

**6.7.23.** При увеличении емкости конденсатора колебательного контура на  $0,08 \text{ мкФ}$  частота колебаний уменьшилась в 3 раза. Найдите первоначальную емкость конденсатора, если индуктивность катушки не изменилась. Ответ представьте в микрофарадах. [0,01]

**6.7.24.** В цепь переменного тока последовательно включены активное сопротивление  $100 \text{ Ом}$  и катушка индуктивностью  $555 \text{ мГн}$ . Средняя мощность, выделяющаяся за период на активном сопротивлении, равна  $18 \text{ Вт}$ . Найдите амплитуду напряжения (в вольтах) на катушке индуктивности, если циклическая частота равна  $300 \text{ с}^{-1}$ . Ответ округлите до целого числа. [100]

**6.7.25.** Определите мощность, выделяемую на сопротивлении величиной  $30 \text{ Ом}$ , в цепи переменного тока с амплитудой силы тока  $0,10 \text{ А}$ . Ответ представьте в единицах СИ. [0,15]

**6.7.26.** Электрический паяльник мощностью  $50 \text{ Вт}$  рассчитан на включение в сеть переменного тока с действующим значением напряжения  $127 \text{ В}$ . Какая мощность будет выделяться в паяльнике, если его включить в сеть переменного тока с действующим значением напряжения  $220 \text{ В}$  последовательно с идеальным диодом? Сопротивление паяльника считать постоянным. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [75]

**6.7.27.** Вторичная обмотка трансформатора, имеющая  $100$  витков, пронизывается магнитным потоком, изменяющемся по закону  $\Phi = 0,01 \cdot \cos(314t)$ . Напишите формулу, выражающую зависимость ЭДС вторичной обмотки от времени. Каково максимальное значение ЭДС самоиндукции (в вольтах) в первичной обмотке, если в первичной обмотке  $10^3$  витков? [3140]

**6.7.28.** К источнику тока ( $r = 0$ ) подключена катушка индуктивностью  $0,8 \text{ Гн}$  и резистор сопротивлением  $25 \text{ Ом}$ . Сразу после размыкания ключа в резисторе выделяется тепловая мощность  $100 \text{ Вт}$ . Активное сопротивление катушки пренебрежимо мало. Какое количество теплоты выделится в резисторе к моменту прекращения тока? Ответ представьте в единицах СИ. [1,6]

**6.7.29.** К сети переменного тока с действующим напряжением 220 В и частотой 50 Гц присоединена цепь, состоящая из последовательно соединенных резистора сопротивлением 92 Ом, конденсатора емкостью 40 мкФ и катушки индуктивностью 0,1 Гн. Найдите амплитуду тока, протекающего в цепи. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [3]

**6.7.30.** Из двух резисторов сопротивлением  $R = 2$  кОм каждый и двух одинаковых конденсаторов емкостью  $C = 2$  мкФ собрана электрическая цепь (рис. 6.19), которая подключена к сети переменного тока с амплитудой напряжения 220 В. Найдите амплитуду колебаний напряжения между точками 1 и 2 и амплитуду колебаний силы тока в подводящей цепи. Частота тока 50 Гц. Сопротивление источника равно нулю. Ответ представьте в единицах СИ. Значение силы тока округлите до десятых. [220; 0,2]

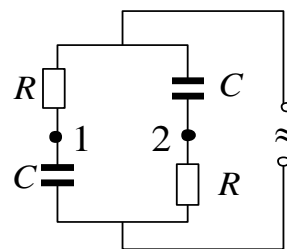


Рис. 6.19

## 6.8.

**6.8.1.** Материальная точка совершает колебания по закону  $x = A \sin \omega t$ . В некоторый момент времени смещение  $x_1$  точки от положения равновесия оказалось равным 5 см. Когда фаза колебания увеличилась вдвое, смещение  $x_2$  стало равным 8 см. Определите амплитуду колебаний. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых. [8,3]

**6.8.2.** Тяжелый шарик, подвешенный на нити длиной 1 м, описывает окружность в горизонтальной плоскости (конический маятник). Определите период обращения шарика, если маятник находится в лифте, движущемся с ускорением  $5 \text{ м/с}^2$ , направленным вниз. Нить составляет с вертикальным направлением угол  $60^\circ$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [2]

**6.8.3.** На какую часть длины нужно уменьшить длину математического маятника, чтобы период его колебаний на высоте 10 км был бы равен периоду его колебаний на поверхности Земли? Ответ представьте в процентах и округлите до десятых. [0,3]

**6.8.4.** Определите время, на которое будут отставать за сутки маятниковые часы, выверенные на уровне моря, если их поднять на высоту 4 км. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [54]



**6.8.5.** Шарик массой  $0,1$  кг совершает синусоидальные колебания на пружине, прикрепленной к стене (рис. 6.20). Жесткость пружины  $1000$  Н/м. На расстоянии, равном половине амплитуды колебания от положения равновесия, установили плиту, от которой шарик упруго отскакивает. Найдите период колебаний шарика в этом случае. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,04]

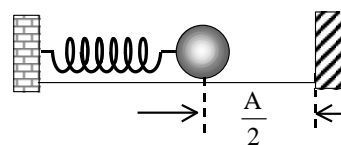


Рис. 6.20

**6.8.6.** Тело совершает гармонические колебания с частотой  $2$  Гц и начальной фазой  $\pi/6$ . Определите минимальный промежуток времени, по истечении которого после начала колебаний кинетическая энергия тела будет равна потенциальной. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,02]

**6.8.7.** Пружинный маятник вывели из положения равновесия и отпустили. Через какое минимальное время (в долях периода  $T$ ) кинетическая энергия колеблющегося тела будет равна потенциальной энергии деформированной пружины? [ $T/8$ ]

**6.8.8.** Математический маятник длиной  $l = 10$  см совершает колебания вблизи вертикальной стенки (рис. 6.21), в которую на расстоянии  $l_1 = 6,4$  см вбит гвоздь Г. Найдите период колебаний такого маятника. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,5]

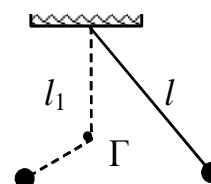


Рис. 6.21

**6.8.9.** Цилиндрическое ведро наполнено водой и подвешено на длинном нерастяжимом шнуре. Из отверстия в дне ведра в течение времени  $t_0$  вытекает вся вода. Постройте качественный график, описывающий изменение периода колебаний ведра от времени. Построение графика обоснуйте расчетом.

**6.8.10.** К пружине динамометра на  $4$  Н (расстояние между нулевым и четвертым делениями равно  $10$  см) был подвешен груз массой  $0,1$  кг (рис. 6. 22). Если отвести груз до отметки  $2$  Н, а затем отпустить, к какому делению (в ньютонах) будет ближе всего находиться указатель динамометра через  $0,3$  с. Ответ округлите до целого числа. [2]

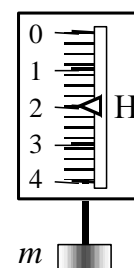


Рис. 6.22

**6.8.11.** На двух вращающихся в противоположные стороны валиках лежит горизонтально доска, как показано на рис. 6. 23. Расстояние между осями валиков равно 2 м. Коэффициент трения между доской и каждым из валиков равен 0,1. В начальный момент доска была положена так, что ее центр масс был смещен на некоторое расстояние  $x$  от средней линии  $OO$ . Покажите, что доска будет совершать гармонические колебания и найдите циклическую частоту колебаний. Ответ представьте в единицах СИ. [1]

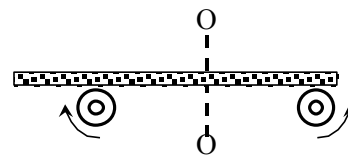


Рис. 6.23

**6.8.12.** Из пункта А в пункт В дважды был послан звуковой сигнал с частотой 50 Гц, причем во второй раз при температуре воздуха на 20 К выше, чем в первый. Число длин волн, укладывающихся на расстоянии от А до В, во второй раз оказалось, как и в первый, целым, но на две меньше. Определите расстояние между пунктами А и В, если при повышении температуры на 1 К скорость звука увеличивается на 0,5 м/с. Скорость звука в первом случае равна 330 м/с. Ответ представьте в единицах СИ. [448,8]

**6.8.13.** В лабораторной работе исследуются две колебательные системы – пружинный маятник и колебательный контур. В ходе работы было установлено, что период  $T_2$  колебаний кинетической энергии груза пружинного маятника втрое меньше периода  $T_4$  колебаний энергии магнитного поля катушки индуктивности в колебательном контуре. Определите по этим данным отношение частоты  $\nu_1$  колебаний смещения груза пружинного маятника к частоте  $\nu_3$  колебаний заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре. [3]

**6.8.14.** Металлический шарик с зарядом  $10^{-9}$  Кл и массой 10 г подвешен на легкой непроводящей нерастяжимой нити длиной 1 м в вертикальном однородном электрическом поле напряженностью  $1 \cdot 10^5$  В/м (рис. 6.24). На сколько отличается период малых колебаний этого шарика около положения равновесия от периода колебаний такого же шарика без заряда? Указание: при  $x \ll 1$  справедлива формула  $(1 + x)^n = 1 + nx$ . Ответ представьте в миллисекундах и округлите до целого числа. [1]

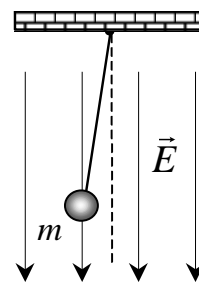


Рис. 6.24

**6.8.15.** Маленький металлический шарик подвешен на нити между горизонтальными пластинами плоского конденсатора. Период колебаний его в отсутствие зарядов равен 0,628 с. После того, как конденсатор и шарик были заряжены, период колебаний стал равным 0,523 с. Каков будет период колебания, если изменить знак заряда шарика на противоположный? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,84]

**6.8.16.** Два одинаковых небольших шарика, имеющих одинаковые заряды 400 нКл, соединены легкой пружиной и находятся на гладкой горизонтальной поверхности. Шарики колеблются так, что расстояние между ними изменяется от 2 см до 8 см. Найдите жесткость пружины, если ее длина в свободном состоянии равна 4 см. Пружина не заряжена и электроизолирована от шариков. Ответ представьте в единицах СИ. [90]

**6.8.17.** Найдите круговую частоту и амплитуду гармонических колебаний частицы, если на расстояниях  $x_1 = 1$  см и  $x_2 = 2$  см от положения равновесия ее скорость равна соответственно  $v_1 = 10$  см/с и  $v_2 = 6$  см/с. Ответы представьте: круговая частота (в единицах СИ), амплитуда (в сантиметрах) и округлите до тысячных. [4,618; 2,385]

**6.8.18.** Какая мощность выделяется в цепи переменного тока, изображенной на рис. 6.25? К клеммам 1 и 2 подведено напряжение с амплитудой 220 В. Сопротивления резисторов одинаковы и равны 200 Ом. Параллельно резистору  $R_1$  включен идеальный диод. Ответ представьте в единицах СИ [211,75]

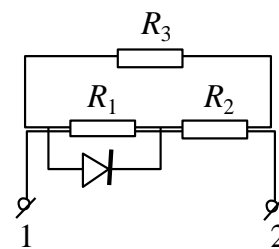


Рис. 6.25

**6.8.19.** Рамка вращается в однородном магнитном поле и содержит 100 витков медного провода сечением  $0,5$  мм<sup>2</sup>. Длина одного витка 0,4 м. Определите действующее значение силы тока в проводнике сопротивлением 5,64 Ом, присоединенном к концам рамки. Максимальная ЭДС, возникающая в рамке, равна 2 В. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,2]

**6.8.20.** Контур состоит из катушки индуктивностью 28 мкГн, резистора сопротивлением 1 Ом и конденсатора емкостью 2222 пФ. Какую мощность будет потреблять контур, если в нем поддерживать незатухающие колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе 5 В? Ответ представьте в милливаттах и округлите до целого числа. [1]

**6.8.21.** В колебательном контуре происходят свободные незатухающие колебания с энергией 5 мДж. Пластины конденсатора медленно раздвинули так, что частота колебаний увеличилась в 2 раза. Какую работу совершили при этом против электрических сил? Ответ представьте в миллиджоулях. [15]

**6.8.22.** В колебательном контуре с катушкой индуктивностью 1,5 мГн при изменении емкости конденсатора резонансная частота увеличилась от 2 до 2,5 МГц. Найдите величину изменения емкости конденсатора. Ответ представьте в пикофарадах и округлите до десятых. [1,5]

**6.8.23.** В идеальном колебательном контуре амплитуда колебаний силы тока в катушке индуктивности 5 мА, а амплитуда колебаний заряда конденсатора 2,5 нКл. В некоторый момент времени заряд конденсатора 1,5 нКл. Определите силу тока в катушке в этот момент. Ответ представьте в миллиамперах. [4]

**6.8.24.** В процессе колебаний в идеальном колебательном контуре в момент времени  $t$  заряд конденсатора равен 4 нКл, а сила тока в катушке 3 мА. Период колебаний равен  $6,3 \cdot 10^{-6}$  с. Определите амплитуду колебаний заряда. Ответ представьте в нанокулонах. [5]

**6.8.25.** Колебательный контур содержит конденсатор емкостью 1 мкФ и катушку индуктивностью 1 мкГн и активным сопротивлением 1 Ом. Найдите отношение энергии магнитного поля к энергии электрического поля в контуре в момент максимума тока. [1]

**6.8.26.** В электрической цепи (рис. 6.26)  $C_1 = C_2 = 0,01$  мкФ. До замыкания ключа К напряжение на первом конденсаторе равно 100 В, второй конденсатор не заряжен. Определите амплитуду колебаний силы тока через катушку индуктивностью 1 мкГн после замыкания ключа. Активным сопротивлением катушки и соединительных проводов пренебречь. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [7]

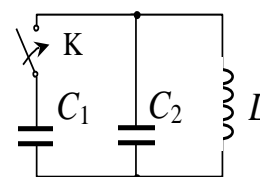


Рис. 6.26

**6.8.27.** Цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора с активным сопротивлением 10 Ом и катушки индуктивности с некоторым активным сопротивлением, подключили к сети с действующим напряжением 220 В. Найдите тепловую мощность, выделяемую в

катушке, если действующее напряжение на резисторе и катушке индуктивности равны соответственно 50 и 160 В. Ответ представьте в единицах СИ. [1015]

**6.8.28.** Колебательный контур (рис. 6.27) содержит конденсатор емкостью  $C = 30$  мкФ и две катушки с индуктивностями  $L_1 = 700$  нГн и  $L_2 = 300$  нГн. Конденсатор при разомкнутом ключе К заряжен до напряжения 100 В. Найдите амплитуду колебаний тока в контуре после замыкания ключа К. Ответ представьте в килоамперах и округлите до десятых. [1,2]

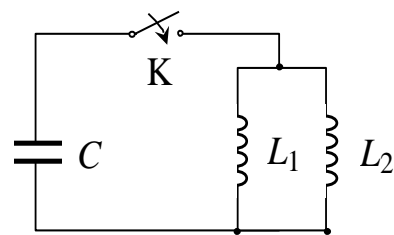


Рис. 6.27

**6.8.29.** Кипятильник работает от сети переменного тока, амплитуда напряжения которого 310 В. При температуре 293 К сопротивление спирали кипятильника 22 Ом. Температурный коэффициент материала спирали  $0,002$  К<sup>-1</sup>. Какое количество кипящей воды превратит кипятильник в пар за 60 с его работы? Ответ представьте в граммах и округлите до целого числа. [50]

**6.8.30.** \*Маятниковые часы установили на железнодорожной платформе. Идентичные часы установили в вагоне скоростной электрички. Электричка отправилась по кольцевому маршруту с 48 остановками. График движения электрички представлен на рис. 6.28. Определите разницу в показаниях часов в момент прибытия электрички в пункт отправления. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [10]

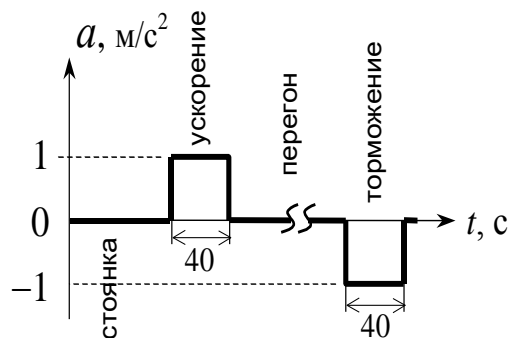


Рис. 6.28

**6.8.31.** \*Чашка пружинных весов массой  $m_1 = 1$  кг совершает вертикальные гармонические колебания с амплитудой  $A = 1$  м. Когда чашка находилась в крайнем нижнем положении на нее поместили груз массой  $m_2 = 2,5$  кг. В результате колебания прекратились. Определите первоначальный период колебаний чашки. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,3]

**6.8.32.** \*На чашку, подвешенную на пружине жесткостью  $k = 100$  Н/м, падает с высоты  $h = 1$  м груз массой  $m = 1$  кг и остается на чашке, то есть удар груза о дно чашки можно считать абсолютно неупругим. Чашка начинает колебаться. Рассчитайте амплитуду колебаний чашки. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. Массой чашки пренебречь. [0,46]

**6.8.33.** \*Математический маятник длиной  $\ell = 10$  м отклонили на небольшой угол  $\alpha$  от вертикали. Маятник совершает синусоидальные колебания. На пути движения маятника находится гладкая стена под углом  $\beta = \alpha/2$  к вертикали (рис. 6.29). Найдите период колебаний маятника. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [4,2]

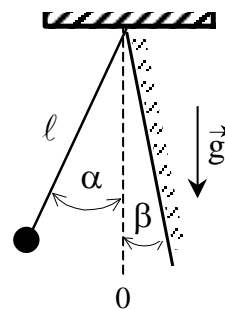


Рис. 6.29

**6.8.34.** \*Под действием постоянного напряжения  $U$  конденсатор емкостью  $C = 10^{-11}$  Ф, включенный в схему, как показано на рис. 6.30, заряжается до заряда  $q = 10^{-9}$  Кл. Индуктивность катушки  $L$  равна  $10^{-5}$  Гн, сопротивление резистора  $R = 100$  Ом. Определите амплитуду установившихся колебаний заряда  $q_m$  конденсатора при резонансе, если амплитуда внешнего синусоидального напряжения  $U_0 = U$ . Ответ представьте в микрокулонах [0,01]

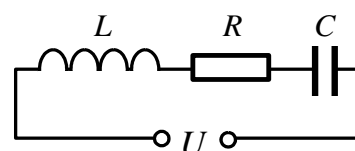


Рис. 6.30

**6.8.35.** \*Конденсатор емкостью  $C = 1$  мкФ после замыкания ключа  $K_1$  начинает разряжаться через резистор сопротивлением  $R = 1$  Ом и катушку индуктивностью  $L = 1$  мкГн (рис. 6.31). В момент, когда ток в цепи достигает максимального значения  $I = 1$  А, замыкают ключ  $K_2$ . Чему равно напряжение на катушке непосредственно перед замыканием ключа  $K_2$  и максимальный ток (в единицах СИ, округлите до сотых) в цепи при последующих колебаниях? [0; 1,41]

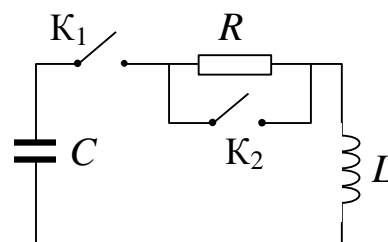


Рис. 6.31

## 7. ОПТИКА. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

### Содержание раздела

Геометрическая оптика. Прямолинейное распространение света. Законы отражения света. Построение изображений в плоском зеркале. Законы преломления света. Полное внутреннее отражение. Линзы. Формула тонкой линзы. Оптическая сила линзы. Построение изображений в собирающей и рассеивающей линзах. Оптические приборы (лупа, проекционный аппарат).

Волновая оптика (световые волны). Интерференция света. Оптическая длина пути и оптическая разность хода. Условия усиления и ослабления интенсивности света при интерференции. Кольца Ньютона. Просветление оптики. Дифракция света. Дифракционная решетка. Условие главных максимумов при дифракции на решетке. Дисперсия света.

Квантовые свойства света. Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц. Гипотеза Планка. Фотоны. Энергия фотона. Импульс фотона. Фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Интенсивность света. Давление света. Волны де Бройля. Дифракция электронов.

### Основные законы и формулы

#### *Геометрическая оптика*

- Абсолютный показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v},$$

где  $c$  и  $v$  – скорость света соответственно в вакууме и в среде.

- Закон отражения света

$$\alpha = \gamma,$$

где  $\alpha$  – угол падения,  $\gamma$  – угол отражения.

- Закон преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

где  $\alpha$  – угол падения,  $\beta$  – угол преломления,  $n_1$ ,  $n_2$  – абсолютные показатели преломления первой и второй сред соответственно,  $n_{21}$  – показате-

тель преломления второй среды относительно первой (относительный показатель преломления).

- Относительный показатель преломления

$$n_{21} = \frac{v_2}{v_1},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости распространения света в первой и второй средах соответственно

- В случае полного внутреннего отражения света

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

где  $\alpha_0$  – предельный угол полного внутреннего отражения,  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления сред (здесь  $n_2 < n_1$ ).

- Формула тонкой линзы

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f},$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы,  $d$  – расстояние от предмета до линзы,  $f$  – расстояние от изображения до линзы (знак “+” перед  $1/F$  соответствует собирающей линзе, знак “–” соответствует рассеивающей линзе, знак “+” перед  $1/f$  соответствует действительному изображению, знак “–” соответствует мнимому изображению).

- Оптическая сила тонкой линзы

$$D = \frac{1}{F} = \left( \frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы,  $n_{\text{л}}$  – абсолютный показатель преломления вещества линзы,  $n_{\text{ср}}$  – абсолютный показатель преломления окружающей среды (одинаковый с обеих сторон линзы),  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы (радиусы выпуклых поверхностей берутся со знаком “+”, вогнутых – со знаком “–”).

- Оптическая сила двух соприкасающихся тонких линз с оптическими силами  $D_1$  и  $D_2$

$$D = D_1 + D_2.$$

- Увеличение линзы  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ ,

где  $h$  – высота предмета,  $H$  – высота изображения,  $d$  – расстояние от предмета до линзы,  $f$  – расстояние от изображения до линзы.

- Увеличение лупы с фокусным расстоянием  $F$



$$\Gamma = d_n/F,$$

где  $d_n = 0,25$  м – расстояние наилучшего зрения.

### ***Волновые свойства света***

- Оптическая длина пути световой волны

$$L = n \cdot l,$$

где  $n$  – показатель преломления среды,  $l$  – геометрическая длина пути световой волны.

- Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

- Условие усиления света длиной волны  $\lambda$  при интерференции (условие интерференционных максимумов)

$$\Delta = k\lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Условие ослабления света длиной волны  $\lambda$  при интерференции (условие интерференционных минимумов)

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Условие главных максимумов интенсивности света при дифракции на дифракционной решетке

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Здесь  $d = l/N$  – период решетки,  $l$  – длина дифракционной решетки,  $N$  – число щелей на длине  $l$ ,  $\varphi$  – угол дифракции (угол между нормалью к поверхности решетки и направлением на соответствующий дифракционный максимум интенсивности света),  $k$  – номер спектра (дифракционного максимума),  $\lambda$  – длина световой волны.

### ***Квантовые свойства света***

- Скорость света в вакууме

$$c = \lambda \cdot \nu,$$

где  $\lambda$  – длина световой волны,  $\nu$  – частота световой волны,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

- Энергия кванта света (фотона)

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

- Импульс фотона  $p = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$

где  $m_\phi$  – масса фотона.

- Формула Эйнштейна для фотоэффекта ( $v_m \ll c$ , нерелятивистский случай)

$$h\nu = A_B + \frac{mv_m^2}{2} = A_B + eU_3,$$

где  $\nu$  – частота световой волны,  $A_B$  – работа выхода электрона из металла,  $m$  – масса электрона,  $v_m$  – максимальная скорость фотоэлектрона,  $mv_m^2/2$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона,  $e$  – заряд электрона,  $U_3$  – задерживающее напряжение.

- Красная граница фотоэффекта для вещества с работой выхода электрона  $A_B$

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_B}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_B},$$

где  $\nu_{\text{кр}}$  и  $\lambda_{\text{кр}}$  – минимальная частота и соответственно максимальная длина световой волны, способной вызвать фотоэффект.

- Объемная плотность энергии монохроматического излучения

$$w = \frac{N h \nu}{V},$$

где  $N$  – число фотонов с энергией  $h\nu$ , содержащихся в объеме  $V$ .

- Интенсивность света (энергия фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения потока фотонов).

$$I = wc = \frac{N h \nu}{St}.$$

- Давление света при его нормальном падении на поверхность

$$p = w(1 + \rho) \quad \text{или} \quad p = \frac{I}{c}(1 + \rho),$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения света (в случае зеркальной поверхности  $\rho = 1$ , в случае черной поверхности  $\rho = 0$ ),  $w$  – объемная плотность энергии излучения,  $I$  – интенсивность излучения,  $c$  – скорость света в вакууме.

### **Волны де Бройля**

- С любой частицей, имеющей массу  $m_0$ , которая движется со скоростью  $v$ , связано распространение волны де Бройля. Длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0 v},$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $p = m_0 v$  – импульс частицы массой  $m_0$ , движущейся со скоростью  $v \ll c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

### Примеры решения задач

**7.1. Закон отражения света.** Два плоских зеркала наклонены друг к другу и образуют двугранный угол  $\varphi$ . На одно из зеркал под некоторым углом  $\alpha_1$  падает световой луч, лежащий в плоскости, перпендикулярной к ребру двугранного угла. Определите, на какой угол  $\delta$  повернется луч после отражения от обоих зеркал.

Дано:  $\varphi, \alpha_1$ .

Определить  $\delta$ .

**Решение.** Пусть световой луч падает на одно из зеркал под углом  $\alpha_1$  (рис. 7.1). Отражившись от него под углом  $\gamma_1$ , луч падает на второе зеркало под углом  $\alpha_2$  и отражается от него под углом  $\gamma_2$ , образуя с первоначальным направлением луча угол  $\delta$ . При этом, согласно закону отражения света:

$$\alpha_1 = \gamma_1, \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \gamma_2. \quad (2)$$

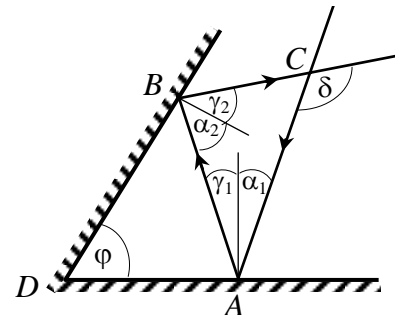


Рис. 7.1

Исходя из геометрии рисунка, находим, что угол  $\delta$  поворота отраженного от зеркал луча – это внешний угол треугольника  $ABC$ . Согласно закону отражения света (формулы 1 и 2) и теореме о свойстве внешнего угла треугольника, угол  $\delta$  можно представить в виде

$$\delta = 2\alpha_1 + 2\alpha_2 = 2(\alpha_1 + \alpha_2), \quad (3)$$

Угол  $\varphi$  наклона друг к другу плоских зеркал и сумма углов  $(\alpha_1 + \alpha_2)$ , как это следует из треугольника  $ABD$ , связаны соотношением:

$$\varphi = \pi - \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) = \alpha_1 + \alpha_2. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), находим, что угол  $\delta$  поворота луча после отражения от обоих зеркал равен  $2\varphi$  и не зависит от угла падения первичного луча

$$\delta = 2\varphi.$$

**7.2. Закон преломления света.** Наблюдатель рассматривает точечный источник света  $S$  через стеклянную пластинку толщиной  $h = 12$  см. При этом он видит мнимое изображение источника  $S'$ . Определите расстояние  $\Delta l$  между положением источника  $S$  и его мнимым изображением  $S'$ . Ответ представьте в сантиметрах.

Дано:  $h = 12$  см,  $n = 1,5$ .

Определить  $\Delta l$ .

**Решение.** Пусть на пластинку (рис. 7.2) под некоторым малым углом  $\alpha$  падает световой луч 1. Преломившись в пластинке и выйдя из нее под таким же углом  $\alpha$ , луч попадает в глаз наблюдателю. Другой луч (луч 2) пусть падает на пластинку перпендикулярно её поверхности и, выходя из пластинки без преломления, также попадает в глаз наблюдателю. Вышедшие из пластинки лучи не пересекаются и, следовательно, не дают действительного изображения источника света  $S$ . Наблюдателю кажется, что эти лучи пересекаются в точке  $S'$  при их обратном продолжении. Очевидно, эта точка является мнимым изображением точечного источника света  $S$ .

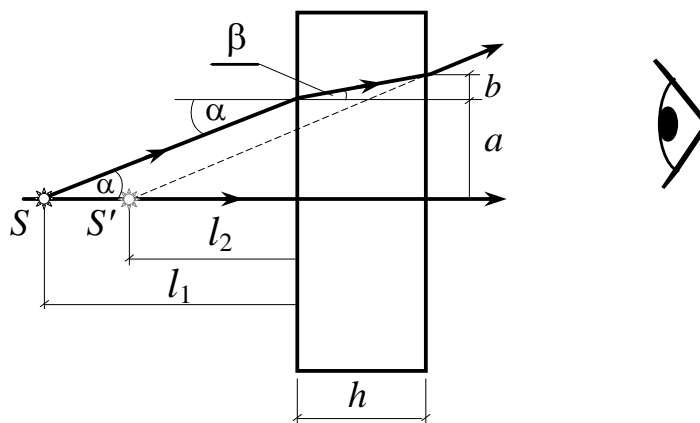


Рис. 7.2

Расстояние  $\Delta l$  между источником света  $S$  и его мнимым изображением  $S'$ , как следует из поясняющего рис. 7.2, можно представить в виде

$$\Delta l = l_1 - l_2, \quad (1)$$

где

$$l_2 = \frac{a+b}{\operatorname{tg}\alpha} - h. \quad (2)$$

Согласно поясняющему рисунку:

$$a = l_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha, \quad (3)$$

$$b = h \cdot \operatorname{tg}\beta. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим

$$l_2 = \frac{l_1 \operatorname{tg}\alpha + h \cdot \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} - h = l_1 + \frac{h}{n} - h. \quad (5)$$

В формуле (5) учтено, что  $\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta} \approx \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$ , так как наблюдатель рассматривает источник света под малыми углами, синусы и тангенсы которых практически одинаковы.

Подставляя (5) в (1), найдем:

$$\Delta l = l_1 - l_1 - \frac{h}{n} + h = \frac{(n-1)h}{n} = 4 \text{ см.}$$

**7.3. Ход светового луча в трехгранной призме.** Световой луч падает на грань стеклянной призмы перпендикулярно её поверхности и выходит из противоположной грани, отклонившись на угол  $\delta = 30^\circ$  от первоначального направления. Определите преломляющий угол  $\varphi$  призмы. Ответ представьте в градусах и округлите до целого.

Дано:  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\delta = 30^\circ$ ,  $n = 1,5$ .

Определить  $\varphi$ .

**Решение.** Как следует из поясняющего рисунка (рис. 7.3), преломляющий угол  $\varphi$  призмы и угол  $\alpha_2$  падения луча на противоположную грань призмы равны как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Угол преломления  $\beta$  на второй грани призмы равен сумме угла падения  $\alpha_2$  и угла отклонения  $\delta$  луча от первоначального направления при выходе из призмы:

$$\beta = \alpha_2 + \delta = \varphi + \delta. \quad (1)$$

Согласно закону преломления света,

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta} = \frac{1}{n},$$

или, учтя (1), имеем

$$\frac{\sin\varphi}{\sin(\varphi + \delta)} = \frac{1}{n}. \quad (2)$$

Преобразуем выражение (2) к виду

$$n \sin\varphi = \sin\varphi \cos\delta + \cos\varphi \sin\delta$$

или

$$(n - \cos\delta) \sin\varphi = \cos\varphi \sin\delta,$$

откуда

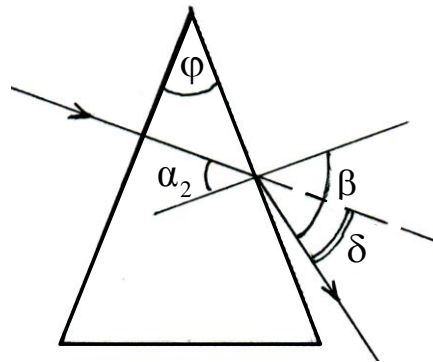


Рис. 7.3

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sin \delta}{n - \cos \delta}. \quad (3)$$

Таким образом, из (3) получим:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin \delta}{n - \cos \delta}\right) \approx 38^\circ.$$

**7.4. Ход лучей в системе из двух линз.** На оси  $x$  в точке  $x_1 = 0$  находится тонкая рассеивающая линза с фокусным расстоянием  $F_1 = -15$  см, а в точке  $x_2 = 20$  см тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием  $F_2 = 25$  см. Главные оптические оси линз лежат на оси  $x$ . Свет от точечного источника  $S$ , расположенного в точке  $x < 0$ , пройдя данную оптическую систему, распространяется параллельным пучком. Найдите координату  $x$  точечного источника.

Дано:  $x_1 = 0$ ,  $F_1 = -15$  см,  $x_2 = 20$  см,  $F_2 = 25$  см,  $x < 0$ .

Определить  $x$ .

**Решение.** Для того чтобы свет от точечного источника  $S$ , пройдя оптическую систему из двух линз, распространялся параллельным пучком, необходимо чтобы мнимое изображение  $S'$  точечного источника  $S$ , даваемое рассеивающей линзой, находилось в фокусе собирающей линзы, как это показано на рис. 7.4. Из рис. 7.4 видно, что координата точечного  $x$  источника света  $S$  может быть представлена как  $x = -d$ , где  $d$  – расстояние от источника до рассеивающей линзы. Для определения этого расстояния используем формулу тонкой линзы

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = -\frac{1}{F_1}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что

$$d = \frac{d' \cdot F_1}{F_1 - d'}, \quad (2)$$

где  $d'$  – расстояние от мнимого изображения  $S'$  точечного источника  $S$  до рассеивающей линзы. Заметим, что  $S'$  есть изображение точечного источника  $S$ , даваемое рассеивающей линзой. Очевидно, что изображение  $S'$  должно находиться в фокусе  $F_2$  собирающей линзы. Только в

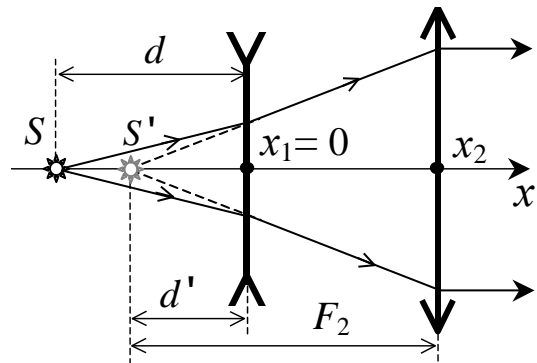


Рис. 7.4

этом случае расходящийся пучок света, пройдя оптическую систему из двух линз, будет распространяться параллельным пучком.

Расстояние  $d'$  выразим исходя из геометрии рис. 7.4

$$d' = F_2 - (x_2 - x_1). \quad (3)$$

Так как  $x_1 = 0$ , то

$$d' = F_2 - x_2. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и учитывая, что координата  $x$  точечного источника  $x = -d$ , получим:

$$x = -\frac{(F_2 - x_2) \cdot F_1}{F_1 - (F_2 - x_2)} = -7,5 \text{ см.}$$

**7.5. Оптическая сила системы тонких линз.** Две одинаковые соприкасающиеся друг с другом тонкие собирающие линзы дают на экране изображение предмета с увеличением  $\Gamma = 5$ . Расстояние между предметом и экраном  $l = 1$  м. Определите (в диоптриях) оптическую силу  $D$  каждой из линз.

Дано:  $\Gamma = 5$ ,  $l = 1$  м.

Определить  $D$ .

**Решение.** Оптическая сила системы, состоящей из вплотную сложенных линз, равна алгебраической сумме оптических сил отдельных линз. Так как в данном случае система состоит из двух одинаковых собирающих линз, оптическая сила каждой из которых равна  $D$ , то оптическая сила такой системы линз может быть определена по формуле

$$2D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где  $d$  и  $f$  – расстояния соответственно от предмета до оптического центра системы линз и от оптического центра системы линз до изображения предмета.

Учтем также, что линейное увеличение системы линз, как и линейное увеличение одной линзы  $\Gamma = f/d$ , откуда

$$f = \Gamma d. \quad (2)$$

Кроме того, из условия задачи следует, что расстояние  $d$  от предмета до оптического центра системы линз равно  $(l - f)$ . Учтя это, формулу (2) представим в виде

$$f = \Gamma(l - f).$$

Отсюда

$$f = \frac{\Gamma l}{1 + \Gamma}. \quad (3)$$

Расстояние от предмета до оптического центра системы линз:

$$d = l - f = l - \frac{\Gamma l}{1 + \Gamma} = \frac{l}{1 + \Gamma}. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (1), получим:

$$2D = \frac{1 + \Gamma}{l} + \frac{1 + \Gamma}{\Gamma l} \Rightarrow D = \frac{(1 + \Gamma)^2}{2\Gamma l} = 3,6 \text{ дптр}$$

**7.6. Интерференция света. Опыт Юнга.** В установке Юнга, находящейся в воздухе, расстояние  $D$  от щелей  $S_1$  и  $S_2$  до экрана равно 3 м, Щель  $S$  освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Определите расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$ , если на экране вблизи центра интерференционной картины расстояние  $\Delta y$  между соседними минимумами 2 мм. Ответ представьте в миллиметрах.

Дано:  $D = 3$  м,  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м,  $\Delta y = 2 \cdot 10^{-3}$  м.

Определить  $d$ .

**Решение.** Приведем схему опыта Юнга (рис. 7.5). Параллельные щели будем рассматривать как источники  $S_1$  и  $S_2$  вторичных когерентных волн, наложение которых приводит к возникновению на экране интерференционной картины. Найдем вначале оптическую

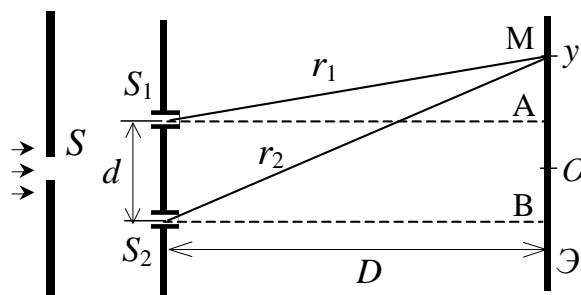


Рис. 7.5

разность хода когерентных волн, приходящих в некоторую точку  $M$  экрана  $\mathcal{E}$  от двух когерентных источников света  $S_1$  и  $S_2$ .

Разность хода  $\Delta$  лучей, приходящих в точку  $M$  экрана от щелей  $S_1$  и  $S_2$ , равна:

$$\Delta = r_2 - r_1. \quad (1)$$

Опустим на экран из  $S_1$  и  $S_2$  перпендикуляры  $S_1A$  и  $S_2B$ . Тогда из прямоугольных треугольников  $S_1AM$  и  $S_2BM$  следует, что:

$$r_1^2 = D^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2, \quad (2)$$

$$r_2^2 = D^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2. \quad (3)$$

Вычитая почленно из выражения (3) выражение (2) и раскрывая скобки, получим



$$r_2^2 - r_1^2 = D^2 + y^2 + yd + \frac{d^2}{4} - D^2 - y^2 + yd - \frac{d^2}{4}$$

или, после упрощений,

$$(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2yd. \quad (4)$$

Так как интерференционная картина наблюдается вблизи центра экрана (точка  $O$ ), то  $x \ll D$  и, следовательно,

$$r_2 + r_1 \approx 2D. \quad (5)$$

Подставляя (1) и (5) в (4), получим формулу для оптической разности хода  $\Delta$  когерентных световых волн

$$\Delta = \frac{yd}{D}. \quad (6)$$

Используя полученную формулу (заметим, что это одна из ключевых формул в задачах на опыт Юнга), определим расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$ . Для этого, в соответствии с данными в условии задачи, представим поясняющий рис 7.6. Как следует из этого рисунка, расстояние между двумя соседними минимумами

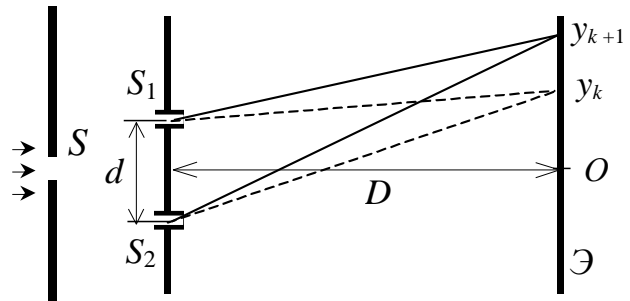


Рис. 7.6

$$\Delta y = y_{k+1} - y_k, \quad (7)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  – порядковый номер интерференционного минимума.

Из формулы (6) следует, что координата интерференционного минимума (или максимума) на экране определяется выражением:

$$y = \frac{D}{d} \Delta. \quad (8)$$

Условием минимума является условие, при котором разность хода  $\Delta$  лучей, приходящих в соответствующую точку экрана от щелей  $S_1$  и  $S_2$ , равна не четному числу длин полуволн:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны.

Тогда, с учетом (9), положения двух соседних минимумов определим на основе формулы (8):

$$y_k = \frac{D}{d}(2k+1)\frac{\lambda}{2}; \quad (10)$$

$$y_{k+1} = \frac{D}{d}(2(k+1)+1)\frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (7), находим:

$$d = D \frac{\lambda}{\Delta y} = 0,9 \text{ мм.}$$

**7.7. Интерференция света. Кольца Ньютона.** Параллельный пучок света падает нормально на плосковыпуклую стеклянную линзу, лежащую выпуклой стороной на стеклянной пластинке. В отраженном свете наблюдаются кольца Ньютона. Оказалось, что между двумя кольцами, радиусы которых  $r_k = 1,3$  мм и  $r_{(k+N)} = 1,5$  мм, расположено три светлых кольца. Кольца наблюдались в отраженном свете при нормальном падении на линзу монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Определите радиус  $R$  плосковыпуклой линзы, взятой для опыта. Ответ представьте в сантиметрах.

Дано:  $r_k = 1,3 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_{(k+N)} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $N = 4$ ,  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м,  $n = 1,5$ .

Определить  $R$ .

**Решение.** Пусть на систему, состоящую из плосковыпуклой линзы и стеклянной пластинки (рис. 7.7) падает параллельный пучок монохроматического света. Оптическая разность хода лучей, отраженных от границ раздела «стекло – воздух» и «воздух – стекло» (лучи 1 и 2) определяется толщиной воздушного зазора  $d_k$  между линзой и пластинкой.

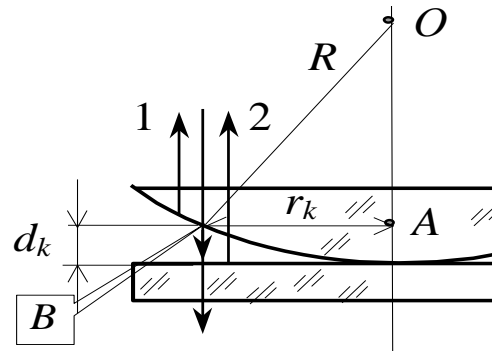


Рис. 7.7

Толщина  $d_k$  этого зазора намного меньше радиуса  $R$  кривизны выпуклой поверхности линзы. Это дает основание утверждать, что лучи 1 и 2 практически параллельны между собой.

Найдем связь между радиусом  $k$ -го кольца Ньютона и радиусом  $R$  плосковыпуклой линзы.

Из треугольника  $AOB$  следует, что квадрат радиуса  $k$ -го кольца Ньютона:

$$r_k^2 = R^2 - (R - d_k)^2 = R^2 - R^2 + 2Rd_k - d_k^2,$$

где  $d_k$  – толщина воздушного зазора в том месте, где наблюдается  $k$ -ое кольцо Ньютона.

Величиной  $d_k^2$  можно пренебречь, так как  $d_k \ll R$ .

Тогда

$$r_k^2 = 2Rd_k. \quad (1)$$

Для светлых колец Ньютона выполняется условие

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – оптическая разность хода интерферирующих лучей,  $k$  – номер соответствующего светлого кольца.

Оптическая разность хода  $\Delta_k$  для  $k$ -го светлого кольца Ньютона в отраженном свете

$$\Delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Оптическая разность хода  $(k + N)$ -го светлого кольца в отраженном свете

$$\Delta_{(k+N)} = 2d_{(k+N)} + \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

При отражении света от оптически более плотной среды в оптической разности хода  $\Delta$  необходимо учитывать дополнительную разность хода  $\lambda/2$ , так как в этом случае фаза колебаний отраженной волны изменяется на  $\pi$ , что эквивалентно изменению оптической разности хода на половину длины волны ( $\lambda/2$ ). В формулах (3) и (4) дополнительная разность хода  $\lambda/2$ , возникающая при отражении света от плоскопараллельной пластинки с показателем преломления  $n = 1,5$ , большем показателя преломления воздуха, учтена.

Используя (2), формулы (3) и (4) представим в виде:

$$2d_k + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}; \quad (5)$$

$$2d_{(k+N)} + \frac{\lambda}{2} = 2(k + N) \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

В соответствии с (1)  $d_k$  и  $d_{(k+N)}$ :

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R}; \quad (7)$$

$$d_{(k+N)} = \frac{r_{(k+N)}^2}{2R}. \quad (8)$$

Подставляя (7) и (8) соответственно в (5) и (6), получим:

$$\frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}; \quad (9)$$

$$\frac{r_{(k+N)}^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = 2(k+N) \frac{\lambda}{2}. \quad (10)$$

Решая систему уравнений (9) и (10) относительно  $R$ , найдем:

$$R = \frac{r_{(k+N)}^2 - r_k^2}{N \cdot \lambda} = 28 \text{ см.}$$

**7.8. Интерференция света. «Просветление» оптики.** На поверхность стеклянной пластинки нанесена тонкая прозрачная пленка фтори-стого магния. На пленку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 552 \text{ нм}$ . При какой наименьшей толщине пленки  $d_{\min}$  она будет «просветляющей»? Ответ представьте в нанометрах.

Дано:  $\lambda = 552 \text{ нм}$ ,  $n_{\text{пл}} = 1,38$ ,  $n_{\text{ст}} = 1,5$ .

Определить  $d_{\min}$ .

**Решение.** Пленка будет «просветляющей», если лучи 1 и 2, отраженные соответственно от границ раздела «воздух – стекло» и «пленка – стекло», будут гасить друг друга, то есть для отраженных лучей должно выполняться условие минимума, при котором оптическая разность хода  $\Delta$  будет равна нечетному числу длин полуво-  
лн,

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$  – целое число,  $\lambda$  – длина световой волны.

Так как показатели преломления воздуха, пленки и стекла находятся в соотношении  $n_{\text{в}} < n_{\text{пл}} < n_{\text{ст}}$ , то изменение фазы колебаний световой волны на  $\pi$  происходит как при отражении от границы раздела «воздух – пленка», так и при отражении от границы раздела «пленка – стекло». В итоге, результат интерференции такой, как

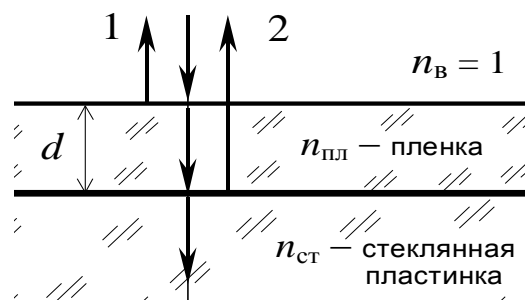


Рис. 7.8

будто бы никакого изменения фаз колебаний отраженных световых волн не произошло. Следовательно, с учетом этого замечания и поясняющего рис. 7.8, разность хода лучей, отраженных от границ раздела «воздух – пленка» и «пленка – стекло», можно записать в виде

$$\Delta = 2dn_{\text{пл}}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), получим

$$2dn_{\text{пл}} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Отсюда

$$d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4n_{\text{пл}}}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что пленка из фтористого магния будет «просветляющей» при дискретных значениях ее толщин  $d$ . Минимальная толщина пленки  $d_{\text{min}}$  соответствует условию  $k = 0$ . Поэтому:

$$d_{\text{min}} = \frac{\lambda}{4n_{\text{пл}}} = 100 \text{ нм}.$$

**7.9. Дифракция света.** Дифракционная решетка с периодом  $d = 25$  мкм расположена параллельно экрану на расстоянии  $l = 1,5$  м от него. На решетку перпендикулярно ее поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Какой (в сантиметрах) должна быть минимальная ширина  $b$  экрана, чтобы на нем можно было наблюдать дифракционные максимумы третьего порядка? Центры решетки и экрана находятся на одной прямой, совпадающей с направлением падающих на решетку световых лучей.

Дано:  $d = 2,5 \cdot 10^{-5}$  м,  $l = 1,5$  м,  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м,  $k = 3$ .

Определить  $b$ .

**Решение.** Из поясняющего рис. 7.9 следует, что минимальную ширину экрана можно представить в виде

$$b = 2l \cdot \text{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол дифракции.

Из условия главных максимумов при дифракции на решетке  $d \sin \varphi = k\lambda$  находим

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d}. \quad (2)$$

Отсюда угол дифракции  $\varphi$  для максимума  $k$ -го порядка ( $k = 3$ ):

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{k\lambda}{d} \right) \approx 3,44^\circ.$$

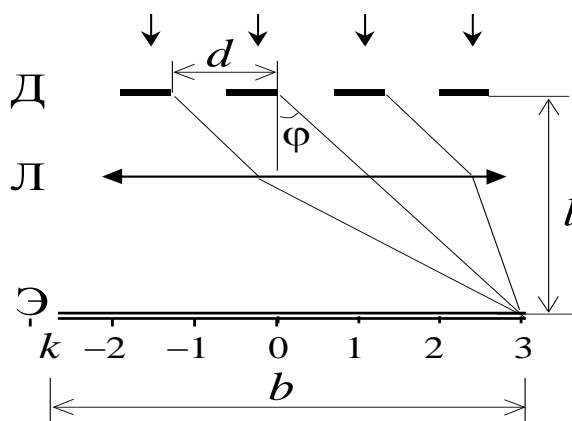


Рис. 7.9

Поскольку угол дифракции мал, а для малых углов  $\operatorname{tg}\varphi \approx \sin\varphi$ , можно заменить  $\operatorname{tg}\varphi$  в (1) на  $\sin\varphi$  из (2). Следовательно, минимальная ширина экрана:

$$b = 2l \cdot \frac{k\lambda}{d} = 18 \text{ см.}$$

**7.10. Дифракция света.** Определите длину  $\lambda$  волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм ( $n = 500 \text{ мм}^{-1}$ ), если известно, что угол между направлениями на максимумы первого и второго порядка  $\Delta\varphi = 18^\circ$ . Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа.

Дано:  $n = 5 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ ,  $\Delta\varphi = 18^\circ$ .

Определить  $\lambda$ .

**Решение.** Запишем условия первого и второго дифракционных максимумов

$$d \sin\varphi = \lambda \quad \Rightarrow \quad \sin\varphi = \lambda / d \quad (1)$$

$$d \sin(\varphi + \Delta\varphi) = 2\lambda. \quad (2)$$

Раскрывая левую часть уравнения (2), получим

$$d(\sin\varphi \cos\Delta\varphi + \cos\varphi \sin\Delta\varphi) = 2\lambda \quad (3)$$

или, с учетом (1),

$$\lambda \cos\Delta\varphi + d \cos\varphi \sin\Delta\varphi = 2\lambda \quad \Rightarrow$$

$$\lambda \cos\Delta\varphi + d \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{d^2}} \cdot \sin\Delta\varphi = 2\lambda \quad \Rightarrow$$

$$\left( d \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{d^2}} \sin\Delta\varphi \right)^2 = (2\lambda - \lambda \cos\Delta\varphi)^2 \quad \Rightarrow$$

$$d^2 \sin^2 \Delta\varphi - \lambda^2 \sin^2 \Delta\varphi = \lambda^2 (4 - 4 \cos \Delta\varphi + \cos^2 \Delta\varphi) \quad \Rightarrow$$

$$d^2 \sin^2 \Delta\varphi = \lambda^2 (\sin^2 \Delta\varphi + 4 - 4 \cos \Delta\varphi + \cos^2 \Delta\varphi).$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{d \sin \Delta\varphi}{\sqrt{5 - 4 \cos \Delta\varphi}}. \quad (4)$$

Постоянная дифракционной решетки определяется формулой

$$d = 1/n, \quad (5)$$

где  $n$  – число штрихов, приходящихся на единицу длины решетки.

Подставляя (5) в (4), получим:

$$\lambda = \frac{\sin \Delta\varphi}{n\sqrt{5 - 4\cos \Delta\varphi}} \approx 565 \text{ нм}.$$

**7.11. Квантовые свойства света.** Облучая катод фотоэлемента пучком света мощностью  $P_1 = 6 \text{ мВт}$  с длиной волны  $\lambda_1 = 300 \text{ нм}$ , измерили силу  $I_{\text{н}}$  фототока насыщения. Какой должна быть мощность  $P_2$  падающего на катод света с длиной волны  $\lambda_2 = 400 \text{ нм}$ , чтобы сила фототока насыщения оказалась такой же, как и в первом случае, если известно, что отношение числа вырванных из катода электронов к числу падающих на его поверхность фотонов в первом случае  $\eta_1 = 0,18$ , а во втором –  $\eta_2 = 0,15$ ? Ответ представьте в милливаттах.

Дано:  $P_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ ,  $\lambda_1 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ,  $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ,  $I_{\text{н1}} = I_{\text{н2}}$ ,  $\eta_1 = 0,18$ ,  $\eta_2 = 0,15$ .

Определить  $P_2$ .

**Решение.** По определению сила тока

$$I = \frac{q}{t} = \frac{e \cdot N_e}{t}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд, прошедший от катода к аноду фотоэлемента в течение времени  $t$ ,  $e$  – элементарный заряд,  $N_e$  – число электронов, испущенных катодом в течение того же самого времени  $t$  и достигших анода.

Так как при разной мощности пучка света, падающего на катод фотоэлемента, токи насыщения одинаковы, то, как это следует из (1), число электронов, выбиваемых светом из катода, в обоих случаях будет одинаковым, то есть

$$N_{e1} = N_{e2} = N_e.$$

Запишем формулу для мощности светового пучка, падающего на катод фотоэлемента

$$P = \frac{W}{t}, \quad (2)$$

где  $W$  – энергия светового пучка, падающего на катод фотоэлемента, определяемая формулой,

$$W = N_{\phi} \cdot h\nu = \frac{N_{\phi} hc}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $N_{\phi}$  – число фотонов, падающих на катод фотоэлемента,  $h\nu$  – энергия фотона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина световой волны.

С учетом (3) формула (2) для мощности светового пучка, падающего на катод фотоэлемента, в первом и втором случаях примет вид:

$$P_1 = \frac{N_{\phi 1} hc}{\lambda_1 t}, \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{N_{\phi 2} hc}{\lambda_2 t}, \quad (5)$$

где  $P_1, N_{\phi 1}, \lambda_1$  и  $P_2, N_{\phi 2}, \lambda_2$  – мощность светового пучка, число фотонов и длина световой волны, падающей на катод фотоэлемента, соответственно в первом и втором случаях.

По условию задачи:

$$\eta_1 = \frac{N_e}{N_{1\phi}} \quad \text{и} \quad \eta_2 = \frac{N_e}{N_{2\phi}},$$

откуда 
$$N_{1\phi} = \frac{N_e}{\eta_1} \quad \text{и} \quad N_{2\phi} = \frac{N_e}{\eta_2}.$$

Подставляя выражения для  $N_{\phi 1}$  и  $N_{\phi 2}$  соответственно в формулы (4) и (5), а затем почленно поделив (5) на (4), получим

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\eta_1 \lambda_1}{\eta_2 \lambda_2}. \quad (6)$$

Из (6) находим:

$$P_2 = \frac{\eta_1 \lambda_1}{\eta_2 \lambda_2} P_1 = 5,4 \text{ мВт}.$$

**7.12. Фотоэффект.** Уединенный проводящий шар радиуса  $R = 10$  см при облучении его светом с длиной волны  $\lambda = 280$  нм, испуская электроны за счет фотоэффекта, может в вакууме приобрести максимальный электрический заряд  $q = 1,6 \cdot 10^{-11}$  Кл. Определите работу выхода  $A_v$  электронов из вещества шара.

Дано:  $R = 0,1$  м,  $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-7}$  м,  $Q = 1,6 \cdot 10^{-11}$  Кл,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $k = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9$  м/Ф.

Определить  $A_v$ .

**Решение.** Работу выхода  $A_v$  электронов из проводящего шара определим, используя уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A_v + E_{k(\max)}, \quad (1)$$

где  $E_{k(\max)}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

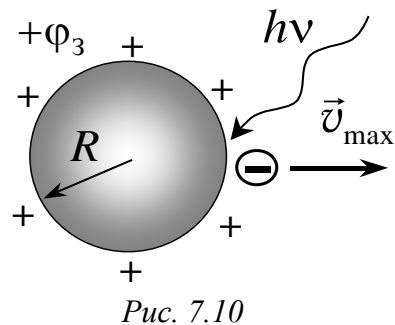


Рис. 7.10



Испуская под действием света электроны (рис. 7.10), шар приобретает положительный заряд  $q$ , что приводит к возникновению для фотоэлектронов задерживающего электрического поля. Испускание шаром электронов прекратится при выполнении условия

$$E_{k(\max)} = e\varphi_3, \quad (2)$$

где  $\varphi_3$  – максимальный потенциал шара (задерживающий потенциал).

Потенциал шара определяется формулой

$$\varphi_3 = k \frac{Q}{R}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) уравнение (1) представим в виде

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{в}} + k \frac{eQ}{R}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим:

$$A_{\text{в}} = \frac{hc}{\lambda} - k \frac{eQ}{R} \approx 2,7 \text{ эВ}.$$

**7.13. Фотоэффект.** Фотон, импульс которого  $p_{\text{ф}} = 2,5 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с, падая на поверхность литиевого фотокатода, вырывает из него электрон, который пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U = 6,5$  В, описывает в однородном магнитном поле окружность радиусом  $R = 1$  см. Определите индукцию  $B$  магнитного поля. Ответ представьте в миллитеслах и округлите до целого числа.

Дано:  $p_{\text{ф}} = 2,5 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с,  $A_{\text{в}} = 2,39$  эВ =  $3,84 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $U = 6,5$  В,  $R = 10^{-2}$  м,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Определить  $B$ .

**Решение.** Как показано на рис. 7.11, электрон, вырванный светом из фотокатода, имеет скорость  $v_1$ . При прохождении ускоряющего электрического поля скорость электрона возрастает и становится равной  $v_2$ . С этой скоростью электрон влетает в магнитное поле и движется по окружности радиусом  $R$ .

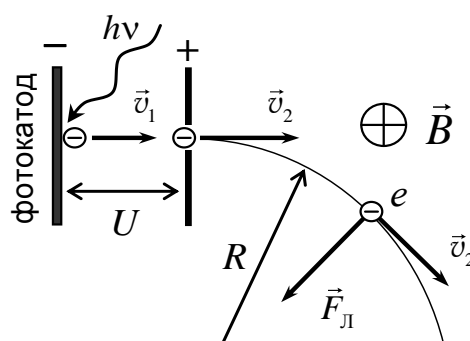


Рис. 7.11

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{в}} + \frac{mv_1^2}{2}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина световой волны,  $m$  – масса электрона,  $A_{\text{в}}$  – работа выхода электрона из металла.

В уравнении (1) величина  $h/\lambda = p_{\text{ф}}$  – импульс фотона. Учтя это обозначение, уравнение (1) запишем в виде

$$p_{\text{ф}}c = A_{\text{в}} + \frac{mv_1^2}{2}, \quad (2)$$

откуда

$$mv_1^2 = 2(p_{\text{ф}}c - A_{\text{в}}). \quad (3)$$

В ускоряющем электрическом поле происходит увеличение кинетической энергии электрона

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = eU. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), находим скорость  $v_2$ , с которой электрон влетает в магнитное поле,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_{\text{ф}}c - A_{\text{в}} + eU)}{m}}. \quad (5)$$

В магнитном поле при движении электрона по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной направлению поля, на электрон действует сила Лоренца

$$F_{\text{л}} = eBv_2. \quad (6)$$

Под действием этой силы электрон движется с центростремительным ускорением  $v_2^2/R$ .

Запишем второй закон Ньютона для движения электрона в магнитном поле

$$eBv_2 = \frac{mv_2^2}{R}. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (5) и (7) относительно  $B$ , получим:

$$B = \frac{1}{eR} \sqrt{2m(p_{\text{ф}}c - A_{\text{в}} + eU)} \approx 1 \text{ мТл}.$$

**7.14. Давление света.** Пучок монохроматического света мощностью  $P = 40$  мВт, излучаемого гелий-неоновым лазером, падает на непрозрачную пластинку под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Пластинка поглощает  $\mu = 25\%$  падающей энергии, а остальную часть энергии зеркально отражает. Найдите величину силы  $F_{\text{н}}$  нормального давления, действующей

щей на пластинку со стороны света. Ответ представьте в наноньютонах и округлите до десятых.

Дано:  $P = 0,04$  Вт,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,25$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Определить  $F_n$ .

**Решение.** Сила  $F_n$  нормального давления света на пластинку определяется формулой

$$F_n = pS, \quad (1)$$

где  $p$  – давление света на пластинку,  $S$  – ее площадь.

При падении света на поверхность пластинки под некоторым углом  $\alpha$  световое давление  $p$  определяется формулой

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho) \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $I = P/S$  – количество энергии, падающей на единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению светового потока, за единицу времени (интенсивность света),  $P$  – мощность лазерного пучка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\rho$  – коэффициент отражения света,  $\alpha$  – угол падения света на поверхность пластинки.

Коэффициент отражения  $\rho$  и коэффициент поглощения  $\mu$  света для непрозрачной пластины связаны соотношением

$$\rho = 1 - \mu.$$

С учетом выражений для  $I$  и  $\rho$  формула (2) примет вид

$$p = \frac{P}{cS}(2 - \mu) \cdot \cos \alpha. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), находим силу нормального давления света, падающего на пластинку:

$$F_n = (2 - \mu) \frac{P}{c} \cdot \cos \alpha = 0,2 \text{ нН}.$$

**7.15. Давление света.** Для разгона космических аппаратов в открытом космосе и коррекции их орбит предложено использовать солнечный парус – скрепленный с аппаратом легкий экран большой площади из тонкой пленки, которая зеркально отражает солнечный свет. Найдите массу космического аппарата, находящегося на орбите Марса, если он снабжен парусом в форме прямоугольника размерами  $100 \times 150$  м<sup>2</sup> и давление солнечных лучей сообщает ему ускорение  $10^{-4}g$ .

Мощность  $W$  солнечного излучения, падающего на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, составляет вблизи Земли  $1370 \text{ Вт}$ . Считать, что Марс находится в  $1,5$  раза дальше от Солнца, чем Земля. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа.

Дано:  $S = 1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ,  $a = 10^{-4} \text{ г} = 10^{-3} \text{ м/с}^2$ ,  $W_3 = 1370 \text{ Вт/м}^2$ ,  $R_M/R_3 = 3/2$ .

Определить  $m$ .

**Решение.** На рис. 7.12 схематически показаны орбиты Земли и Марса, а также космический аппарат, находящийся на орбите Марса. Так как космический аппарат движется с центростремительным ускорением, его массу можно определить на основе второго закона Ньютона

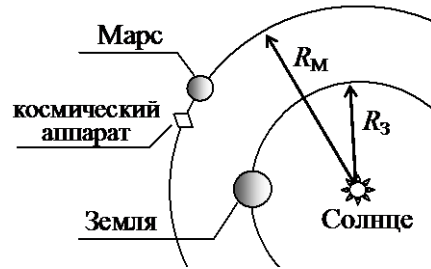


Рис. 7.12

$$m = \frac{F_M}{a}, \quad (1)$$

где  $F_M$  – сила светового давления на парус площадью  $S$  космического аппарата, находящегося на орбите Марса.

$$F_M = p_M \cdot S, \quad (2)$$

где  $p_M$  – давление света на орбите Марса

$$P_M = (1 + \rho) \frac{W_M}{c}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения поверхности паруса,  $W_M$  – мощность солнечного излучения, падающего на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, вблизи Марса,  $c$  – скорость света в вакууме.

В случае зеркального отражения солнечного света  $\rho \approx 1$ . Тогда (3) представим в виде

$$P_M = \frac{2W_M}{c}. \quad (4)$$

Мощность излучения  $W$ , падающего нормально на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, обратно пропорциональна квадрату расстояния от данной поверхности до источника излучения:

$$W_M = \frac{\text{const}}{R_M^2}, \quad W_3 = \frac{\text{const}}{R_3^2}.$$

Тогда

$$\frac{W_M}{W_3} = \frac{R_3^2}{R_M^2} \Rightarrow W_M = W_3 \left( \frac{R_3}{R_M} \right)^2, \quad (5)$$

где  $R_M$  и  $R_3$  – радиусы орбит Марса и Земли, соответственно,  $W_3$  – мощность солнечного излучения, падающего на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, вблизи Земли.

Выполняя последовательно подстановку (5) в (4), затем в (2) и (1), найдем:

$$m = \frac{2W_3 S}{a \cdot c} \left( \frac{R_3}{R_M} \right)^2 \approx 61 \text{ кг}.$$

**7.16. Волны де Бройля.** Электроны, прошедшие ускоряющую разность потенциалов  $U$ , направляются перпендикулярно на мономолекулярный слой вещества (рис. 7.13). В результате дифракции на молекулах, образующих периодическую структуру, некоторая часть электронов отклоняется на определенные углы, образуя дифракционные максимумы. Какова разность потенциалов ускоряющего электрического поля, если известно, что первый дифракционный максимум соответствует отклонению электронов на угол  $\varphi = 30^\circ$  от первоначального направления, а период  $d$  мономолекулярной решетки равен  $0,6 \text{ нм}$ ? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа.

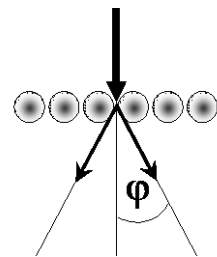


Рис. 7.13

Дано:  $k = 1$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $d = 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

Определить  $U$ .

**Решение.** Согласно гипотезе де Бройля, микрочастицы (в данном случае электроны), движущиеся со скоростью  $v$ , обладают волновыми свойствами. Длина волны де Бройля определяется формулой

$$\lambda_B = \frac{h}{m_e v}. \quad (1)$$

Условием дифракционных максимумов для электронов, испытывающих дифракцию на периодической структуре, является такое же условие, как и условие максимумов при дифракции света на дифракционной решетке

$$d \cdot \sin \varphi = k \lambda. \quad (2)$$

Скорость  $v$  электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U$ , определим по формуле

$$v = \sqrt{2eU/m_e} . \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} . \quad (4)$$

Условие (2) дифракционных максимумов, с учетом (4), представим в виде

$$d \sin \varphi = \frac{kh}{\sqrt{2m_e eU}} ,$$

откуда разность потенциалов ускоряющего электрического поля:

$$U = \frac{1}{2m_e e} \cdot \left( \frac{kh}{d \sin \varphi} \right)^2 \approx 22 \text{ В} .$$

### Задачи для самостоятельного решения

#### 7.1.

**7.1.1.** Вертикальный шест отбрасывает тень длиной 1,15 м, когда Солнце находится на высоте  $60^\circ$  над горизонтом. Определите высоту шеста. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [2]

**7.1.2.** Высота Солнца над горизонтом  $54^\circ$ . Каким должен быть угол падения (в градусах) солнечных лучей на плоское зеркало, чтобы отраженные от зеркала солнечные лучи распространялись вертикально вверх? [18]

**7.1.3.** Высота Солнца над горизонтом  $38^\circ$ . Каким должен быть угол падения (в градусах) солнечных лучей на плоское зеркало, чтобы отраженные от зеркала солнечные лучи распространялись вертикально вниз? [64]

**7.1.4.** На какой угол (в градусах) повернется отраженный от зеркала солнечный луч при повороте зеркала на угол  $25^\circ$ ? [50]

**7.1.5.** Угол отклонения луча от первоначального направления при его отражении от плоского зеркала равен  $50^\circ$ . Определите угол падения (в градусах) луча на зеркало. [65]

- 7.1.6.** Предмет находится от плоского зеркала на расстоянии 12 см. На каком расстоянии (в сантиметрах) от предмета окажется его изображение, если предмет отодвинуть от зеркала еще на 9 см? [42]
- 7.1.7.** Светящаяся точка приближается в направлении нормали к плоскому зеркалу со скоростью 3 м/с. С какой скоростью изменяется расстояние между точкой и ее изображением в зеркале? Ответ представьте в единицах СИ. [6]
- 7.1.8.** При переходе луча из одной среды в другую угол падения равен  $45^\circ$ , а угол преломления  $30^\circ$ . Каков показатель преломления второй среды относительно первой? Ответ округлите до десятых. [1,4]
- 7.1.9.** Луч света, падая на границу раздела двух сред под углом  $50^\circ$ , преломляется под углом  $30^\circ$ . Каким будет угол преломления, если угол падения уменьшить в два раза? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [16]
- 7.1.10.** Каков угол полного внутреннего отражения при падении луча на границу стекло-вода? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [62]
- 7.1.11.** Во сколько раз скорость распространения света в веществе с показателем преломления 1,5 больше, чем в среде с показателем преломления 1,8? Ответ обоснуйте. [1,2]
- 7.1.12.** Определите оптическую силу собирающей линзы с фокусным расстоянием 50 см. Ответ представьте в единицах СИ. [2]
- 7.1.13.** Определите поперечное увеличение лупы, фокусное расстояние которой равно 2,5 см. [10]
- 7.1.14.** Предмет находится на расстоянии 12 см от двояковыпуклой линзы с фокусным расстоянием 10 см. Определите расстояние (в сантиметрах) от линзы до изображения предмета. [60]
- 7.1.15.** Предмет находится на расстоянии 12 см от двояковогнутой линзы с фокусным расстоянием 10 см. Определите расстояние от линзы до изображения предмета. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых. [5,5]
- 7.1.16.** Длина световой волны в воде 435 нм. Какова длина этой волны в воздухе? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [579]

**7.1.17.** Оптическая разность хода  $\Delta$  двух интерферирующих волн равна  $0,2\lambda$ . Определите разность фаз  $\Delta\varphi$ . Ответ представьте в градусах. [72]

**7.1.18.** Два когерентных источника испускают световые волны, частота которых  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. Усиление или ослабление света будет наблюдаться в точке с разностью хода, равной  $1,5$  мкм? Ответ обоснуйте. [Ослабление]

**7.1.19.** Определите период дифракционной решетки, если известно, что третий дифракционный максимум при дифракции света с длиной волны  $500$  нм наблюдается под углом, синус которого равен  $0,25$ . Ответ представьте в микрометрах. [6]

**7.1.20.** Определите импульс фотона, соответствующий частоте  $10^{15}$  Гц. Ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{27}$  и округлите до десятых. [2,2]

**7.1.21.** Два источника света излучают волны, длины которых  $3,25 \cdot 10^{-7}$  м и  $6,5 \cdot 10^{-7}$  м соответственно. Определите отношение импульсов  $p_1/p_2$  фотонов, излучаемых первым и вторым источниками. [2]

**7.1.22.** Определите массу фотона, энергия которого равна  $4,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Ответ (в килограммах) умножьте на  $10^{35}$ . [0,5]

**7.1.23.** Определите энергию кванта света, соответствующего длине волны  $600$  нм. Ответ (в джоулях) умножьте на  $10^{19}$  и округлите до десятых. [3,3]

**7.1.24.** Предельная частота  $\nu_{min}$ , соответствующая красной границе фотоэффекта для лития, равна  $5,77 \cdot 10^{14}$  Гц. Определите работу выхода электронов из лития. Ответ (в джоулях) умножьте на  $10^{19}$  и округлите до сотых. [3,83]

**7.1.25.** Максимальная кинетическая энергия электрона, вырванного светом из фотокатода, равна  $1,5$  эВ. Определите энергию (в электрон-вольтах) фотона, вызвавшего фотоэффект, если известно, что работа выхода электрона из материала фотокатода равна  $2,3$  эВ. [3,8]

## 7.2.

**7.2.1.** Применяя закон отражения света, постройте изображение светящейся точки  $S$  в зеркале, рис. 7.14. Действительным (1) или мнимым (2) будет это изображение? Ответ обоснуйте. [2]



Рис. 7.14



7.2.2. Точечный источник света находится между двумя взаимно перпендикулярными плоскими зеркалами. Сколько получается изображений этого источника? Ответ обоснуйте их построением. [3]

7.2.3. На сколько клеток и в каком направлении необходимо переместить точку  $A$  (рис. 7.15), чтобы изображение стрелки в зеркале **было видно** из этой точки полностью? Ответ обоснуйте. [На одну клетку вверх]

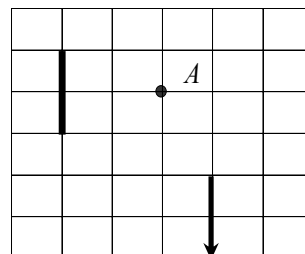


Рис. 7.15

7.2.4. На сколько клеток и в каком направлении необходимо переместить точку  $A$  (рис. 7.16), чтобы изображение стрелки **совсем не было видно** из этой точки? Ответ обоснуйте. [На две клетки вниз]

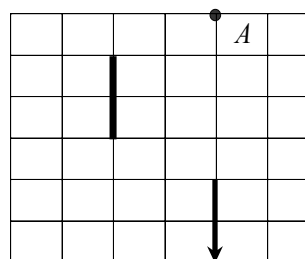


Рис. 7.16

7.2.5. На какое минимальное число клеток и в каком направлении необходимо переместить точку  $A$  (рис. 7.17), чтобы изображение стрелки в зеркале **стало видно** из этой точки полностью? Ответ обоснуйте. [На одну клетку вверх]

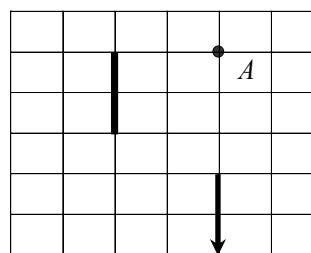


Рис. 7.17

7.2.6. Постройте изображение светящейся точки, если между светящейся точкой и глазом помещается плоскопараллельная стеклянная пластина. Действительным (1) или мнимым (2) будет это изображение? Ответ обоснуйте. [2]

7.2.7. Наблюдатель рассматривает предмет АВ через стеклянную призму  $A$  (рис. 7.18). Мнимым (1) или действительным (2) видит наблюдатель этот предмет? Ответ обоснуйте. [1]

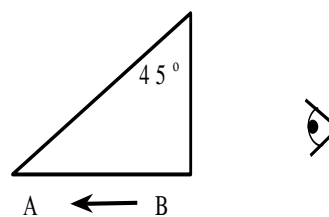


Рис. 7.18

**7.2.8.** Наблюдатель рассматривает предмет АВ через стеклянную призму А (рис. 7.19). Прямым (1) или перевернутым (2) видит наблюдатель этот предмет? Ответ обоснуйте. [2]

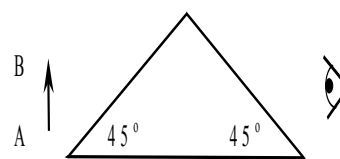


Рис. 7.19

**7.2.9.** Два лазерных луча красного и зеленого цвета направляются перпендикулярно на грань призмы из стекла, находящейся в воздухе (рис. 7.20). В точках А и В экрана наблюдаются яркие цветные пятна. Каковы цвета пятен в этих точках. Ответ обоснуйте. [В точке А – зеленый, в точке В – красный]

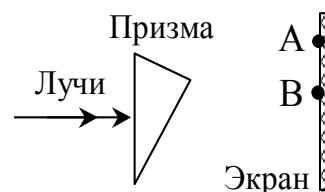


Рис. 7.20

**7.2.10.** Постройте ход падающего на рассеивающую линзу луча (рис. 7.21).

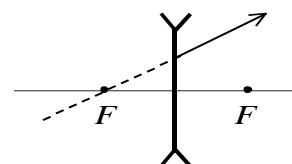


Рис. 7.21

**7.2.11.** На тонкую линзу падает луч света (рис. 7.22). Построением найдите ход луча после его преломления линзой.

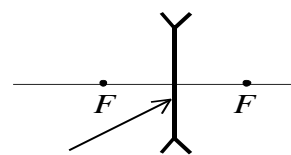


Рис. 7.22

**7.2.12.** Построением найдите положение светящейся точки, если известен ход лучей после их преломления в рассеивающей линзе (рис. 7.23).

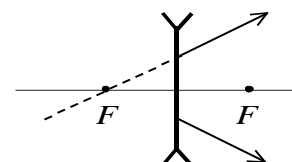


Рис. 7.23

**7.2.13.** Построением найдите ход второго луча, падающего на рассеивающую линзу (рис. 7.24).

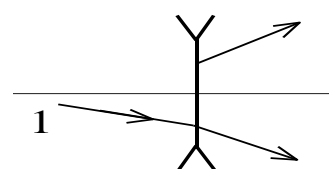


Рис. 7.24

**7.2.14.** Построением найдите положение оптического центра и фокусов линзы. На рис. 7.25: S – точечный источник света; S' – его изображение



Рис. 7.25

ние, даваемое линзой; MN – главная оптическая ось линзы.

**7.2.15.** Постройте изображение предмета АВ в рассеивающей линзе (рис. 7.26). Получите для данного случая (с учетом правила знаков) формулу расстояния  $d$  от предмета до линзы.

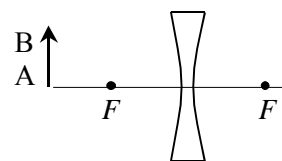


Рис. 7.26

**7.2.16.** Постройте изображение предмета АВ в рассеивающей линзе (рис. 7.27). Получите для данного случая (с учетом правила знаков) формулу расстояния  $d$  от предмета до линзы.

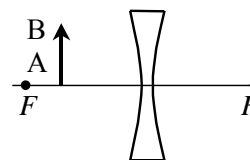


Рис. 7.27

**7.2.17.** Постройте изображение светящейся точки  $S$ , расположенной на главной оптической оси рассеивающей линзы (рис. 7.28). Действительным (1) или мнимым (2) будет это изображение? Ответ обоснуйте. [2]

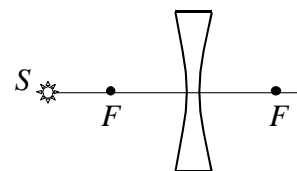


Рис. 7.28

**7.2.18.** Напишите формулу тонкой линзы для примера, представленного на рис. 7.29. Постройте изображение предмета АВ в линзе.

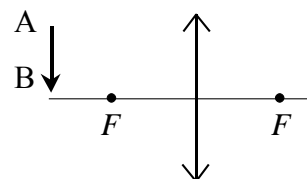


Рис. 7.29

**7.2.19.** Напишите формулу тонкой линзы для примера, представленного на рис. 7.30. Постройте изображение предмета АВ в линзе.

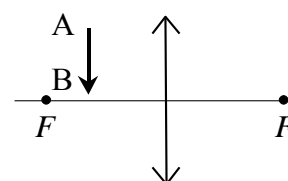


Рис. 7.30

**7.2.20.** Точечный источник света находится в фокальной плоскости собирающей линзы на некотором расстоянии от главной оптической оси. С другой стороны линзы находится плоское зеркало, расположенное перпендикулярно к главной оптической оси. Где будет находиться изображение источника? Ответ обоснуйте построением хода лучей в этой оптической системе. [В той же фокальной плоскости линзы]

**7.2.21.** Как надо расположить две собирающие линзы, чтобы параллельный пучок света, пройдя через них, остался параллельным? Ответ обоснуйте построением хода лучей в системе этих двух линз.

**7.2.22.** Как надо расположить собирающую и рассеивающую линзы, чтобы параллельный пучок света, пройдя через них, остался параллельным? Ответ обоснуйте построением хода лучей в системе этих двух линз.

**7.2.23.** С помощью собирающей линзы на экране получено действительное изображение предмета с увеличением  $\Gamma_1$ . Не изменяя положение линзы, поменяйте местами предмет и экран. Каким окажется увеличение  $\Gamma_2$  в этом случае? Ответ обоснуйте. [ $1/\Gamma_1$ ]

**7.2.24.** Напишите условие наблюдения интерференционного максимума. Постройте график зависимости разности хода от длины волны в вакууме ( $k = \text{const}$ ), где  $k$  – порядок интерференционного максимума.

**7.2.25.** На рис. 7.31 показаны зависимости (1 и 2) задерживающего напряжения  $U_3$  от частоты света для двух различных материалов катода. Какой из материалов (1 или 2) имеет большую работу выхода? Ответ обоснуйте. [2]

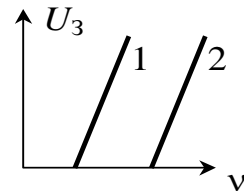


Рис. 7.31

### 7.3.

**7.3.1.** Луч света падает нормально на границу раздела двух сред. Каков угол (в градусах) отражения луча? Ответ обоснуйте. [0]

**7.3.2.** Какова должна быть наименьшая высота вертикального плоского зеркала, чтобы человек, высота которого  $h$ , мог видеть в нем свое изображение, не изменяя положения головы? Ответ обоснуйте. [ $h/2$ ]

**7.3.3.** Чему равен угол (в градусах) преломления, если луч света падает на плоскую границу раздела двух сред под предельным углом полного внутреннего отражения, переходя из оптически более плотной среды в менее плотную? Ответ обоснуйте. [90]

**7.3.4.** Луч света падает на границу раздела воздух – стекло. Показатель преломления стекла равен  $n$ . При каком угле падения  $\alpha$  отраженный луч перпендикулярен к преломленному лучу? Ответ обоснуйте. [ $\alpha = \text{arctg } n$ ]

**7.3.5.** В центре полого толстостенного стеклянного шара находится точечный источник света. Будут ли преломляться световые лучи, распространяясь от источника света через стенки шара? Ответ обоснуйте.

**7.3.6.** Луч света проходит через три прозрачные однородные среды с показателями преломления  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  (рис. 7.32). Каково соотношение между показателями преломления сред? Ответ обоснуйте. [ $n_1 = n_3$ ;  $n_2 < n_3$ ]

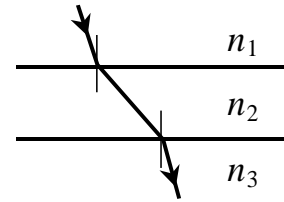


Рис. 7.32

**7.3.7.** Одинакова ли скорость распространения красных и фиолетовых лучей: а) в вакууме; б) в воде? Ответ обоснуйте. [а) Одинакова; б) Не одинакова,]

**7.3.8.** Оптическая плотность льда меньше, чем воды. В какой из этих сред свет распространяется с большей скоростью? Ответ обоснуйте. [Во льду]

**7.3.9.** Каким физическим явлением (поглощением света, его отражением, поляризацией или преломлением) объясняется появление радуги при падении лучей солнечного света на капли дождя? Ответ обоснуйте. [Преломлением света]

**7.3.10.** Как, получив при помощи собирающей линзы изображение удаленного предмета, определить фокусное расстояние линзы? Ответ обоснуйте.

**7.3.11.** Как изменится фокусное расстояние линзы, изготовленной из стекла, если ее опустить в воду? Ответ обоснуйте. [Увеличится]

**7.3.12.** С помощью собирающей линзы на экране получено действительное изображение предмета. Сколько еще четких изображений можно получить, если менять положение: а) только линзы; б) только предмета; в) только экрана? Ответ обоснуйте. [а) Одно; б) Ни одного; в) Ни одного]

**7.3.13.** В точку Р на экране Э (рис. 7.33) световые волны от когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  приходят с отставанием одна от другой на  $2 \cdot \frac{\lambda}{2}$ , где  $\lambda$  – длина каждой из этих волн. Усиление (1) или ослабление (2) света наблюдается в точке Р? Ответ обоснуйте. [1]

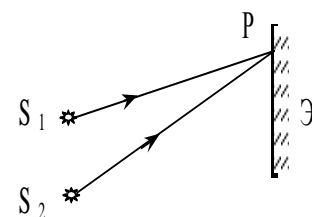


Рис. 7.33

**7.3.14.** В точку Р на экране Э (рис. 7.35) световые волны от когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  приходят с отставанием одна от другой на  $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$ , где  $\lambda$  – длина каждой из этих волн. Усиление (1) или ослабление (2) света наблюдается в точке Р? Ответ обоснуйте. [2]

**7.3.15.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет сначала с длиной волны  $\lambda_1$ , а затем свет с длиной волны  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ). В каком случае (1 или 2) угол наблюдения дифракционного максимума первого порядка больше? Ответ обоснуйте. [2]

**7.3.16.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет сначала с частотой  $\nu_1$ , а затем с частотой  $\nu_2$  ( $\nu_1 < \nu_2$ ). В каком случае (1 или 2) угол наблюдения дифракционного максимума первого порядка больше? Ответ обоснуйте. [1]

**7.3.17.** Луч лазера падает нормально на дифракционную решетку. Каково отношение расстояния между нулевым и первым к расстоянию между нулевым и вторым дифракционными максимумами на удаленном от решетки экране? Углы дифракции считать малыми. Ответ обоснуйте. [1:2]

**7.3.18.** Четное (1) или нечетное (2) число максимумов дает дифракционная решетка? Ответ обоснуйте. [2]

**7.3.19.** Частота красного света примерно в 2 раза меньше частоты фиолетового света. Каково отношение импульса «красного» фотона к импульсу «фиолетового» фотона? [0,5]

**7.3.20.** Металлическую пластинку освещают сначала светом с частотой  $\nu_1 > \nu_k$ , а затем с частотой  $\nu_2 < \nu_k$ , где  $\nu_k$  - красная граница фотоэффекта. В каком случае (1 или 2) будет наблюдаться фотоэффект? Ответ обоснуйте. [1]

**7.3.21.** Металлическую пластинку освещают сначала светом с длиной волны  $\lambda_1 > \lambda_k$ , а затем светом с длиной волны  $\lambda_2 < \lambda_k$ , где  $\lambda_k$  – красная граница фотоэффекта. В каком случае (1 или 2) будет наблюдаться фотоэффект? Ответ обоснуйте. [2]

**7.3.22.** Металлическую пластинку освещают сначала светом с частотой  $\nu_1$ , а затем с частотой  $\nu_2$  ( $\nu_1 > \nu_2$ ). В каком случае (1 или 2) скорость фотоэлектронов имеет большее значение? Ответ обоснуйте. [1]

**7.3.23.** Металлическую пластинку освещают сначала светом с длиной волны  $\lambda_1$ , а затем светом с длиной волны  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ). В каком случае (1 или 2) скорость фотоэлектронов имеет большее значение? Ответ обоснуйте. [2]

**7.3.24.** Фотокатод освещается светом, энергия фотонов которого равна 3,5 эВ. Фотоэлектроны, вылетающие из фотокатода, задерживаются электрическим полем. На рис. 7.34 представлен график зависимости силы фототока от напряжения задерживающего поля. Определите работу выхода электронов из фотокатода. Ответ представьте в электронвольтах. [2,5]

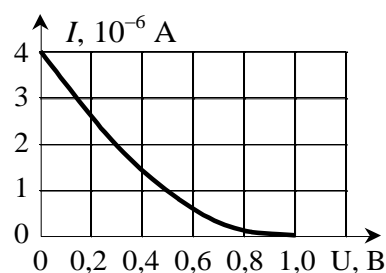


Рис. 7.34

**7.3.25.** Почему давление света на черную поверхность в два раза меньше, чем на зеркальную? Ответ обоснуйте.

## 7.4.

**7.4.1.** Угол падения солнечного луча на поверхность воды равен  $45^\circ$ . Под каким углом к горизонту водолаз, находясь под водой, будет видеть Солнце? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [58]

**7.4.2.** Скорость распространения света в первой прозрачной среде равна  $2,25 \cdot 10^5$  км/ч, а во второй  $2 \cdot 10^5$  км/ч. Луч света падает на границу раздела этих сред под углом падения  $30^\circ$  и переходит во вторую среду. Определите синус угла преломления луча. Ответ округлите до сотых. [0,44]

**7.4.3.** Световой луч проходит в вакууме расстояние 30 см, а в прозрачной жидкости за это же время расстояние 0,25 м. Определите показатель преломления жидкости. [1,2]

**7.4.4.** Определите угол преломления светового луча при падении из воздуха на поверхность стекла, если угол падения  $60^\circ$ . Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [35]

- 7.4.5.** На какой угол отклонится луч от первоначального направления, упав под углом  $45^\circ$  на поверхность стекла? Ответ округлите до целого числа. [17]
- 7.4.6.** Какова оптическая сила линзы, если расстояние между предметом и равным ему действительным изображением равно 2 м? [2]
- 7.4.7.** Предмет находится на расстоянии 0,125 м от собирающей линзы, фокусное расстояние которой 0,12 м. Определите расстояние (в метрах) от линзы до резкого изображения этого предмета на экране. [3]
- 7.4.8.** Предмет находится перед рассеивающей линзой на расстоянии  $4F$ . На каком расстоянии от линзы получится его мнимое изображение? [0,8F]
- 7.4.9.** Каково фокусное расстояние собирающей линзы, если для получения изображения какого-нибудь предмета в натуральную величину этот предмет должен быть помещен на расстоянии 20 см от линзы? Ответ представьте в единицах СИ. [0,1]
- 7.4.10.** Расстояние от собирающей линзы до предмета в три раза больше фокусного расстояния. Определите увеличение линзы. [0,5]
- 7.4.11.** На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы, оптическая сила которой равна 5 дптр, надо поместить предмет, чтобы его изображение было уменьшено в 3 раза? Ответ представьте в единицах СИ. [0,8]
- 7.4.12.** Предмет находится на расстоянии 10 м от рассеивающей линзы. Мнимое изображение наблюдается на расстоянии 2,5 м от линзы. Определите оптическую силу этой линзы. [−0,3]
- 7.4.13.** Чему равна оптическая сила линзы, если пучок лучей, параллельных главной оптической оси линзы, после преломления в ней расходится, а продолжения лучей пересекаются на расстоянии 25 см от линзы? Какая это линза – собирающая или рассеивающая? [−4, рассеивающая]
- 7.4.14.** Скорость распространения зеленого света в стекле равна  $2 \cdot 10^5$  км/с, а в вакууме  $3 \cdot 10^5$  км/с. Какова длина волны этого света в стекле, если в вакууме она равна 500 нм? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [333]



**7.4.15.** Разность хода лучей двух когерентных источников света с длиной волны 600 нм, сходящихся в некоторой точке, равна 1,5 мкм. Усиление или ослабление света будет наблюдаться в этой точке? Ответ обоснуйте. [Ослабление]

**7.4.16.** Два полупрозрачных зеркала расположены параллельно друг другу. На них перпендикулярно плоскости зеркал падает монохроматический свет. Первый интерференционный минимум в отраженном свете наблюдается при расстоянии между зеркалами  $1,5 \cdot 10^{-7}$  м. Какова длина световой волны? Ответ представьте в нанометрах. [600]

**7.4.17.** На дифракционную решетку с периодом 10 мкм нормально падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определите угол наблюдения, соответствующий второму дифракционному максимуму. Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [7]

**7.4.18.** Свет от газоразрядной трубки падает нормально на дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на миллиметр. Максимум первого порядка для красной линии виден под углом  $30^\circ$ , а максимум того же порядка для зеленой линии – под углом  $27^\circ$  ( $\sin 27^\circ = 0,454$ ). Какова разность длин волн красной и зеленой линий? Ответ представьте в нанометрах. [92]

**7.4.19.** На дифракционную решетку с периодом 2,5 мкм нормально падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Найдите общее число максимумов, даваемое дифракционной решеткой на экране. [9]

**7.4.20.** Дифракционная картина поочередно наблюдается с помощью двух дифракционных решеток. Если поставить решетку с периодом  $d_1 = 20$  мкм, то на расстоянии  $l_0$  от центрального максимума наблюдается красная линия второго порядка ( $\lambda_1 = 730$  нм). Если использовать вторую решетку, то в том же месте наблюдается фиолетовая линия пятого порядка ( $\lambda_2 = 440$  нм). Определите период  $d_2$  второй решетки. Ответ представьте в микрометрах и округлите до целого числа. [30]

**7.4.21.** Определите показатель преломления среды, в которой свет с энергией фотона 2,75 эВ имеет длину волны  $3 \cdot 10^{-7}$  м. Ответ округлите до десятых. [1,5]

**7.4.22.** Красная граница фотоэффекта для серебра равна 264 нм. Определите работу выхода электронов из серебра. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [4,7]

**7.4.23.** Цинковая пластинка освещается светом с длиной волны 0,45 мкм. Возникает ли в этом случае фотоэффект? [Не возникает]

**7.4.24.** Для прекращения фотоэффекта при освещении некоторого металла светом с длиной волны  $6 \cdot 10^{-7}$  м необходимо приложить задерживающее напряжение 0,175 В. Определите работу выхода электронов из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [1,9]

**7.4.25.** Определите длину волны де Бройля, характеризующую волновые свойства электрона, если он движется со скоростью  $1,3 \cdot 10^6$  м/с. Ответ представьте в нанометрах и округлите до сотых. [0,56]

## 7.5.

**7.5.1.** Определите предельный угол полного внутреннего отражения при падении света на границу раздела двух сред: стекло – вода. Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [62]

**7.5.2.** Под каким углом должен упасть световой луч на стекло, чтобы преломленный луч оказался перпендикулярным к отраженному? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [56]

**7.5.3.** На плоскопараллельную прозрачную для света пластину толщиной 2 см падает луч под углом  $60^\circ$ . Определите угол преломления луча, если при выходе из пластины он смещается, на 1 см. Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [36]

**7.5.4.** На рис. 7.35 показан ход луча через плоскопараллельную пластину, находящуюся в воздухе. Определите показатель преломления вещества пластины. [2]

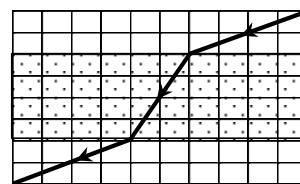


Рис. 7.35

**7.5.5.** Столб вбит в дно реки и возвышается над водой на 1 м. Найдите длину тени столба на дне реки, если высота Солнца над горизонтом  $30^\circ$  (угол между солнечным лучом и поверхностью воды), глубина реки 2 м, Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [3,45]

**7.5.6.** Расстояние от предмета до собирающей линзы в 5 раз больше фокусного расстояния линзы. Определите увеличение линзы. [0,25]

**7.5.7.** На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы, оптическая сила которой равна 5 дптр, надо поместить предмет, чтобы его изображение было уменьшено в 3 раза? Ответ представьте в единицах СИ. [0,8]

**7.5.8.** Предмет расположен в фокальной плоскости рассеивающей линзы. Во сколько раз линза уменьшает размеры предмета? [2]

**7.5.9.** Предмет находится перед рассеивающей линзой на расстоянии  $mF$ . На каком расстоянии от линзы получится мнимое изображение? [ $mF/(m+1)$ ]

**7.5.10.** Если предмет расположен перед передним фокусом собирающей линзы на расстоянии 10 м от него, то изображение получится на расстоянии 2,5 м за другим фокусом. Найдите оптическую силу линзы. Ответ представьте в единицах СИ. [0,2]

**7.5.11.** На расстоянии 15 см от двояковыпуклой линзы, оптическая сила которой 10 дптр, находится предмет высотой 2 см. Определите высоту изображения предмета. Ответ представьте в сантиметрах. [4]

**7.5.12.** Мыльная пленка образует клин. Пучок монохроматического света, падая на клин нормально, создает в проходящем свете интерференционную картину чередующихся темных и светлых полос. В месте, где находится третья, считая от ребра клина, светлая полоса, толщина пленки составляет 675 нм. Показатель преломления пленки равен  $4/3$ . Определите длину волны света. Ответ представьте в нанометрах. [600]

**7.5.13.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$ . Период дифракционной решетки  $4\lambda$ . Под каким углом будет наблюдаться второй дифракционный максимум? Ответ представьте в градусах. [30]

**7.5.14.** На дифракционную решетку с постоянной 0,01 мм падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол  $20^\circ$ . Определите длину волны света. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [579]

**7.5.15.** Какова ширина всей видимой области спектра первого порядка (интервал длин волн 0,38 – 0,76 мкм), полученного на экране, отстоящем на 3 м от дифракционной решетки с периодом 0,01 мм? Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. [11]

**7.5.16.** На дифракционную решетку с шириной непрозрачных промежутков 2000 нм и шириной прозрачных щелей 2500 нм нормально падает параллельный пучок белого света. Найдите (в нанометрах) длину волны света, для которой под углом  $30^\circ$  наблюдается максимум третьего порядка. [750]

**7.5.17.** Вычислите длину волны, соответствующей фотону, энергия которого равна энергии покоя электрона. Ответ представьте в пикометрах и округлите до десятых. [2,4]

**7.5.18.** Каков импульс фотона, энергия которого равна  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж? Ответ представьте в единицах СИ и умножьте на  $10^{27}$ . [2]

**7.5.19.** Длина волны красной границы фотоэффекта для металлической пластинки равна 290 нм. Определите работу выхода электрона из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [4,3]

**7.5.20.** Красная граница фотоэффекта для некоторого металла 400 нм. Определите работу выхода электронов из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до целого числа. [3]

**7.5.21.** Определите, при каком задерживающем напряжении прекратится вырывание электронов из цезиевого катода, освещенного светом с длиной волны 400 нм. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,2]

**7.5.22.** В опыте А. Столетова на цинковую пластинку направлялось излучение от электрической дуги. До какого максимального потенциала заряжалась при этом пластинка, если наименьшая длина волны в спектре излучения дуги равнялась 300 нм? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,4]

**7.5.23.** В вакууме находятся два электрода, к которым подключен конденсатор емкостью 2800 пФ. При длительном освещении одного из электродов (фотокатода) светом с длиной волны 250 нм фототок между электродами, возникший вначале, прекращается, а на конденсаторе появляется заряд 8 нКл. Определите работу выхода электронов из вещества фотокатода. Емкостью системы электродов пренебречь. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [2,1]

**7.5.24.** Сколько фотонов поглощает глаз человека за 1 с, если он воспринимает свет длиной волны 0,5 мкм при мощности светового потока  $2 \cdot 10^{-17}$  Вт? Ответ округлите до целого числа. [50]

**7.5.25.** Определите длину волны де Бройля, характеризующую волновые свойства электрона, если его кинетическая энергия равна 1 кэВ. Ответ представьте в пикометрах и округлите до целого числа. [39]

## 7.6.

**7.6.1.** Луч падает на поверхность воды под углом  $50^\circ$  к горизонту. Под каким углом к горизонту должен упасть луч на поверхность стекла, чтобы угол преломления оказался таким же? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [44]

**7.6.2.** Пучок параллельных световых лучей падает из воздуха на толстую стеклянную пластину под углом  $60^\circ$  и, преломляясь, переходит в стекло. Ширина пучка в воздухе 10 см. Определите ширину пучка в стекле. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых. [16,3]

**7.6.3.** Во сколько раз показатель преломления первой среды больше показателя преломления второй среды, если предельный угол полного внутреннего отражения равен  $30^\circ$ ? [2]

**7.6.4.** Точечный источник света расположен в воде на глубине 1 м. Каков радиус круга на поверхности воды, в пределах которого возможен выход лучей в воздух? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [1,14]

**7.6.5.** На дне водоема глубиной 2 м лежит зеркало. Луч света, пройдя через воду, отражается от зеркала и выходит из воды. Найдите расстояние между точкой входа луча в воду и точкой выхода из воды, если угол падения входящего луча равен  $30^\circ$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [1,62]

**7.6.6.** Параллельный световой пучок падает перпендикулярно на собирающую линзу (рис. 7.36), оптическая сила которой 8 дптр. Диаметр линзы равен 5 см. Каков внешний диаметр светлого кольца на экране, отстоящем от линзы на расстоянии 40 см? Ответ представьте в сантиметрах. [11]

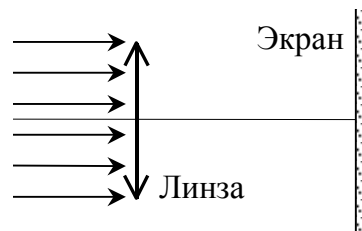


Рис. 7.36

**7.6.7.** Параллельный пучок света падает перпендикулярно на собирающую линзу. На расстоянии 20 см от нее находится рассеивающая линза (рис. 7.37). Оптическая сила собирающей линзы 2,5 дптр. Оптическая сила рассеивающей линзы равна  $-5$  дптр. Диаметр линз равен 5 см. Экран расположен на расстоянии 30 см от рассеивающей линзы. Каков диаметр светлого пятна, создаваемого линзами на экране? Ответ представьте в сантиметрах. [2,5]

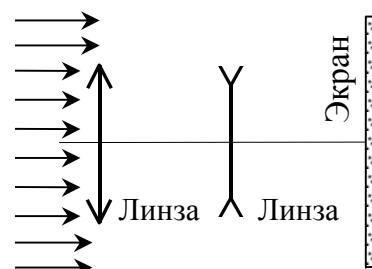


Рис. 7.37

**7.6.8.** Параллельный пучок света падает перпендикулярно на собирающую линзу. На расстоянии 20 см от нее расположена рассеивающая линза (см. рис. 7.39). Оптическая сила собирающей линзы 5 дптр, фокусное расстояние рассеивающей линзы 10 см. Диаметр линз равен 5 см. Каким должно быть расстояние от рассеивающей линзы до экрана, чтобы экран был освещен равномерно? Ответ представьте в сантиметрах. [20]

**7.6.9.** Изображение светящейся точки в рассеивающей линзе расположено в два раза ближе к линзе, чем сама точка. Найдите, на каком расстоянии от линзы находится светящаяся точка, если известно, что она лежит на главной оптической оси линзы. Оптическая сила линзы равна  $-5,0$  дптр. Ответ представьте в сантиметрах. [20]

**7.6.10.** Расстояние наилучшего видения для пожилого человека равно 60 см. Найдите оптическую силу очков, способных обеспечить ему уменьшение этого расстояния до 20 см. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [3,3]

**7.6.11.** На тонкую пленку с показателем преломления 1,4, находящуюся в воздухе, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 560 нм. При какой наименьшей толщине пленки  $d_{\min}$  отраженный от нее свет окажется максимально усиленным в результате интерференции? Ответ представьте в нанометрах. [100]

**7.6.12.** В интерференционном опыте «Кольца Ньютона» стеклянная линза касается стеклянной пластинки, рис. 7.38. Какова толщина воздушного зазора в месте нахождения третьего светлого интерференционного кольца в отраженном свете? Свет падает на линзу нормально и имеет длину волны 520 нм. Ответ представьте в нанометрах. [650]

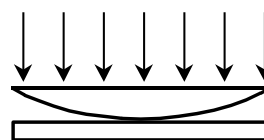


Рис. 7.38

**7.6.13.** Определите наибольший порядок спектра для желтой линии излучения натрия с длиной волны 589 нм, если постоянная дифракционной решетки 2 мкм. [3]

**7.6.14.** На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально пучок монохроматического света с длиной волны 0,43 мкм. Найдите общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. [11]

**7.6.15.** Дифракционная решетка с периодом 20 мкм расположена параллельно экрану на расстоянии 1 м от него. Дифракционную решетку освещают перпендикулярно падающим светом с длиной волны 590 нм. Какой должна быть минимальная ширина экрана, чтобы можно было наблюдать дифракционные максимумы второго порядка? Центры решетки и экрана расположены вдоль луча падающего света. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. [12]

**7.6.16.** Гелий-неоновый (He + Ne) газовый лазер, работающий в непрерывном режиме, дает излучение монохроматического света с длиной волны 630 нм, развивая мощность 40 мВт. Сколько фотонов излучает лазер за 1 с? Ответ поделите на  $10^{15}$  и округлите до целого числа. [127]

**7.6.17.** Красная граница фотоэффекта для некоторого металла 276 нм. Определите работу выхода электронов из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [4,5]

**7.6.18.** Металлический шарик, изолированный от других тел, облучают монохроматическим светом с длиной волны 200 нм. Шарик, теряя фотоэлектроны, заряжается до максимального потенциала 3 В. Определите работу выхода электрона из материала шарика. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [3,2]

**7.6.19.** Определите наибольшую длину волны света, облучение которым поверхности никеля может вызвать фотоэффект. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [257]

**7.6.20.** Катод фотоэлектронного устройства освещается светом с частотой  $10^{15}$  Гц. При увеличении частоты в 1,2 раза задерживающее напряжение между катодом и анодом, при котором фототок становится равным нулю, необходимо увеличить в 1,5 раза. Определите частоту красной границы фотоэффекта для материала фотокатода. Ответ представьте в терагерцах. [600]

**7.6.21.** Пучок ультрафиолетовых лучей с длиной волны  $10^{-7}$  м сообщает металлической поверхности мощность  $10^{-6}$  Вт. Определите силу возникшего фототока, если фотоэффект вызывает 1 % падающих фотонов. Ответ представьте в наноамперах и округлите до десятых. [0,8]

**7.6.22.** Одна из пластин плоского воздушного незаряженного конденсатора освещается светом с частотой  $10^{15}$  Гц. Фотоэлектроны, попадающие на другую пластину, заряжают ее, в результате чего между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов  $U$ . Определите максимальное значение  $U$ , если работа выхода электрона 2 эВ. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [2,1]

**7.6.23.** Какой длины волны свет падает на поверхность цезия, если максимальная скорость фотоэлектронов равна  $6 \cdot 10^5$  м/с? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [427]

**7.6.24.** Красная граница фотоэффекта для вольфрама 275 нм. Определите максимальную кинетическую энергию электронов, вырываемых из вольфрама светом с длиной волны 175 нм. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [2,6]

**7.6.25.** Луч лазера мощностью 51 мВт падает на поглощающую поверхность. Определите силу светового давления на эту поверхность. Ответ представьте в наноニュтонах. [0,17]

## 7.7.

**7.7.1.** Свет падает на границу раздела двух сред под углом  $30^\circ$  и переходит во вторую среду. Показатель преломления первой среды 2,4. Определите показатель преломления второй среды, если отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. Ответ округлите до десятых. [1,4]

**7.7.2.** Распространяющийся в стекле параллельный пучок света имеет ширину 20 см. Свет падает на границу стекло – воздух под углом  $30^\circ$ . Определите ширину пучка после перехода его в воздух через эту границу. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. [15]

**7.7.3.** Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку под углом  $60^\circ$ . Определите смещение луча относительно первоначального направления, если толщина пластинки 3 см. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых. [1,5]



**7.7.4.** На грань стеклянной призмы под углом  $30^\circ$  падает луч света (рис. 7.39). Преломляющий угол призмы  $60^\circ$ . На какой угол от первоначального направления отклоняется вышедший из призмы луч? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [47]

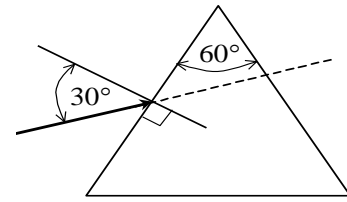


Рис. 7.39

**7.7.5.** Каков преломляющий угол призмы из стекла, если луч, упавший нормально на одну ее грань, выходит вдоль другой? Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа. [42]

**7.7.6.** Луч монохроматического света выходит из треугольной призмы под углом, равным углу падения на первую ее преломляющую грань. При этом угол отклонения луча от его первоначального направления составляет  $40^\circ$ . Определите угол падения луча на призму, если ее преломляющий угол  $60^\circ$ . Ответ представьте в градусах. [50]

**7.7.7.** Предмет и его прямое изображение расположены симметрично относительно фокуса линзы. Расстояние от предмета до фокуса линзы равно 4 см. Определите фокусное расстояние линзы. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до сотых. [9,66]

**7.7.8.** На систему из двух линз: собирающей с фокусным расстоянием 25 см и рассеивающей с фокусным расстоянием  $-10$  см, главные оптические оси которых совпадают, со стороны собирающей линзы падает вдоль главной оптической оси параллельный пучок света. Пройдя систему линз, пучок остается параллельным. Определите расстояние между линзами. Ответ представьте в сантиметрах. [15]

**7.7.9.** Боковая сторона  $ad$  прямоугольной трапеции  $abcd$  расположена на главной оптической оси собирающей линзы (рис. 7.40). Линза дает действительное изображение в виде трапеции с теми же самыми углами. При этом сторона  $cd$  изображается с увеличением, равным 0,6. Приближая трапецию к линзе вдоль главной оптической оси на некоторое расстояние, можно получить изображение трапеции в виде прямоугольника. С каким увеличением изображается сторона  $cd$  в этом случае? [1,5]

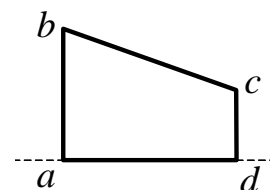


Рис. 7.40

**7.7.10.** Боковая сторона  $ad$  прямоугольной трапеции  $abcd$  расположена на главной оптической оси собирающей линзы (рис. 7.41). Линза дает действительное изображение в виде трапеции с теми же самыми углами. Если повернуть трапецию  $abcd$  на  $180^\circ$  вокруг стороны  $cd$ , то линза дает изображение трапеции в виде прямоугольника. С каким увеличением изображается сторона  $cd$  в этом случае? [2]

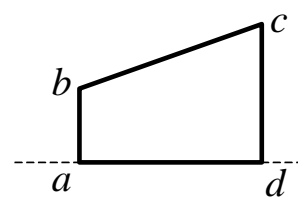


Рис. 7.41

**7.7.11.** Изображение предмета на матовом стекле фотоаппарата с расстояния 14,9 м получилось высотой 30 мм, а с расстояния 9 м – высотой 50 мм. Определите высоту предмета. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [2,95]

**7.7.12.** Изображение на пленке фотоаппарата можно считать резким, если на ней вместо идеального изображения в виде точки получается изображение в виде пятна диаметром не более 0,03 мм. Поэтому, если объектив находится от пленки на расстоянии, равном фокусному расстоянию, то при диаметре входного отверстия (диафрагмы), равном 4 мм, резкими будут не только бесконечно удаленные предметы, но и предметы, находящиеся от объектива на расстоянии не меньше чем 3,6 м. Определите фокусное расстояние объектива. Ответ представьте в миллиметрах. [27]

**7.7.13.** В установке Юнга (рис. 7.42), находящейся в воздухе, расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$  равно 1 мм, а расстояние  $L$  от щелей до экрана 3 м. Определите разность хода лучей, приходящих в точку экрана  $M$ , если расстояние  $\ell$  до нее от центра экрана 3 мм. Ответ представьте в микрометрах. [1]

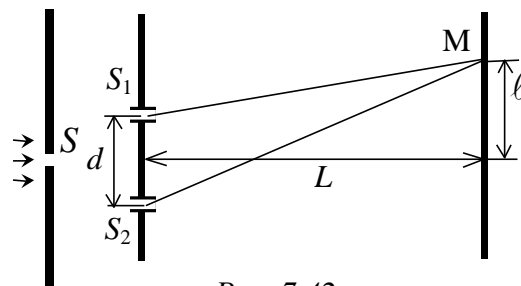


Рис. 7.42

**7.7.14.** В установке Юнга (см. рис. 7.44), находящейся в воздухе, расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$  равно 1 мм. Щель  $S$  освещается монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Определите расстояние  $L$  от щелей  $S_1$  и  $S_2$  до экрана, если на экране вблизи центра интерференционной картины расстояние между двумя соседними максимумами 1,8 мм. Ответ представьте в единицах СИ. [3]

**7.7.15.** В установке Юнга (см. рис. 7.44), находящейся в воздухе, расстояние  $L$  от щелей  $S_1$  и  $S_2$  до экрана равно 2 м. Щель  $S$  освещается монохроматическим светом с длиной волны 500 нм. Определите расстояние  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$ , если на экране вблизи центра интерференционной картины расстояние между двумя соседними минимумами 2 мм. Ответ представьте в миллиметрах. [0,5]

**7.7.16.** На поверхность стеклянной призмы нанесена тонкая пленка с показателем преломления  $n_{\text{пл}} < n_{\text{ст}}$  толщиной 112,5 нм. На пленку по нормали к ней падает свет с длиной волны 630 нм. При каком значении показателя преломления  $n_{\text{пл}}$  пленка будет «просветляющей»? [1,4]

**7.7.17.** Параллельный пучок света падает нормально на плосковыпуклую линзу с радиусом кривизны 6,4 м, лежащую выпуклой стороной на стеклянной пластинке. В отраженном свете наблюдаются кольца Ньютона. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 4 мм. Определите длину волны падающего на линзу света. Ответ представьте в нанометрах. [500]

**7.7.18.** Между краями двух хорошо отшлифованных тонких плоских стеклянных пластинок помещена тонкая проволочка. Противоположные концы пластинок плотно прижаты друг к другу. На верхнюю пластинку нормально к ее поверхности падает монохроматический пучок света длиной волны 600 нм. Определите угол  $\alpha$ , который образуют пластинки, если расстояние между наблюдаемыми интерференционными полосами равно 0,6 мм. Считать  $\text{tg}\alpha \approx \alpha$ . Ответ представьте в радианах и умножьте на  $10^4$ . [5]

**7.7.19.** Параллельный пучок монохроматического света падает нормально на дифракционную решетку с периодом 3 мкм. При этом углы дифракции, соответствующие двум соседним дифракционным максимумам, равны  $23^\circ$  ( $\sin 23^\circ = 0,391$ ) и  $36^\circ$  ( $\sin 36^\circ = 0,588$ ). Определите энергию фотонов светового пучка. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [2,1]

**7.7.20.** При какой температуре средняя энергия теплового движения атомов одноатомного газа будет равна энергии электронов, выбиваемых из цинковой пластинки монохроматическим светом с длиной волны 325 нм? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [657]

**7.7.21.** Если поочередно освещать поверхность некоторого металла светом с длинами волн 350 нм и 540 нм, то максимальные скорости фотоэлектронов будут отличаться в два раза. Определите работу выхода электрона из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [1,9]

**7.7.22.** При освещении фотокатода светом с длиной волны 400 нм, а затем 500 нм обнаружили, что задерживающее напряжение для прекращения фотоэффекта изменилось в 2 раза. Определите работу выхода электронов из этого металла. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до сотых. [1,86]

**7.7.23.** Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda$ . При задерживающей разности потенциалов 0,8 В ток в цепи прекращается. При изменении длины волны света в 1,5 раза для прекращения фототока потребовалось увеличить задерживающую разность потенциалов до 1,8 В. Найдите работу выхода электрона из материала катода? Ответ представьте в электронвольтах. [1,2]

**7.7.24.** При облучении литиевого фотокатода светом с длиной волны 300 нм из него выбиваются электроны, которые, пройдя ускоряющую разность потенциалов 5 В, попадают в мишень. Определите импульс, передаваемый мишени одним электроном. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{25}$  и округлите до целого числа. [14]

**7.7.25.** Фотон, падая на поверхность металла, находящегося в магнитном поле с индукцией  $10^{-4}$  Тл, вырывает электрон, который, двигаясь перпендикулярно линиям магнитной индукции, описывает дугу, радиус которой 5 см. Работа выхода электрона из металла 2,5 эВ. Определите импульс фотона. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{27}$  и округлите до десятых. [2,5]

**7.7.26.** Фотон с длиной волны, соответствующей красной границе, выбивает электрон из металлической пластинки (фотокатода), находящейся в сосуде, из которого откачан воздух. Электроны разгоняются постоянным электрическим полем напряженностью 500 В/м. За какое время электрон может разогнаться в этом электрическом поле до скорости  $5 \cdot 10^6$  м/с? Ответ представьте в микросекундах и округлите до сотых. [0,06]

**7.7.27.** На анод рентгеновской трубки, работающей под напряжением 70 кВ, падает каждую секунду  $6 \cdot 10^{15}$  электронов. В результате рентгеновская трубка излучает за это же время  $3 \cdot 10^{13}$  фотонов со средней длиной волны  $\lambda$ , равной  $10^{-10}$  м. Определите коэффициент полезного действия  $\eta$  рентгеновской трубки. Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [0,09]

**7.7.28.** За время 4 с детектор поглощает  $6 \cdot 10^5$  фотонов падающего на него монохроматического света. Поглощаемая мощность равна  $5 \cdot 10^{-14}$  Вт. Какова длина волны падающего света? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [597]

**7.7.29.** Параллельный пучок света с длиной волны 0,5 мкм падает нормально на черную поверхность, при этом давление света равно  $1 \cdot 10^{-9}$  Па. Определите число фотонов, заключенных в  $1 \text{ м}^3$  падающего светового потока. Ответ умножьте на  $10^9$  и округлите до десятых. [2,5]

**7.7.30.** Определите длину волны де Бройля, характеризующую волновые свойства атома водорода, движущегося со скоростью, равной средней квадратичной скорости атома водорода при температуре  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ответ представьте в нанометрах и округлите до сотых. [0,15]

## 7.8.

**7.8.1.** \*Внутренняя поверхность конуса покрыта отражающим слоем, образующим коническое зеркало. Вдоль оси конуса внутри него натянута тонкая светящаяся нить. Определите минимальный угол  $\alpha_{\min}$  раствора конуса, при котором лучи, идущие от нити, будут отражаться от поверхности конуса не более одного раза. Ответ представьте в градусах. [120]

**7.8.2.** Из одной точки, в которой находится точечный источник света  $S$ , на поверхность жидкости падают взаимно перпендикулярные лучи 1 и 2, рис. 7.43. Угол преломления первого луча  $30^\circ$ , угол преломления второго луча  $45^\circ$ . Определите показатель преломления жидкости. Ответ округлите до сотых. [1,15]

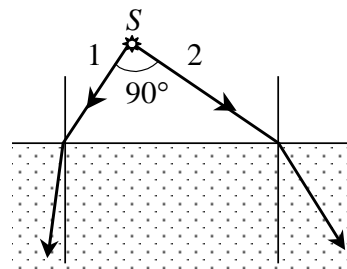


Рис. 7.43

**7.8.3.** В воздухе длина волны монохроматического света равна 600 нм. При переходе в стекло длина волны меняется и становится равной 420 нм. Под каким углом падает свет на плоскую границу раздела воздух – стекло, если отраженный и преломленный лучи образуют прямой угол? Ответ (в градусах) округлите до целого числа. [55]

**7.8.4.** На дне стеклянной ванны лежит зеркало, поверх которого налит слой воды высотой 20 см. В воздухе на высоте 30 см над поверхностью воды висит лампа. На каком расстоянии от поверхности воды смотрящий в воду наблюдатель будет видеть изображение лампы в зеркале? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,6]

**7.8.5.** На дне сосуда, заполненного водой, лежит плоское зеркало. Человек, наклонившийся над сосудом, видит изображение своего глаза в зеркале на расстоянии наилучшего зрения 25 см, когда расстояние от глаза до поверхности сосуда 5 см. Определите глубину сосуда. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. Углы считать малыми. [10]

**7.8.6.** \*В днище судна сделан стеклянный иллюминатор для наблюдения за морскими животными. Диаметр иллюминатора 40 см много больше толщины стекла. Определите площадь обзора дна из такого иллюминатора. Показатель преломления морской воды 1,4, расстояние до дна 5 м. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [82]

**7.8.7.** В стекле имеется сферическая полость радиусом 3 см, заполненная водой. На полость падают параллельные лучи света. Определите радиус светового пучка, который проникает в полость. Ответ представьте в сантиметрах. [2,66]

**7.8.8.** \*Внутри стеклянного шара радиусом 0,1 м слева от его центра вблизи поверхности находится точечный источник света  $S$  (рис. 7.44). На каком расстоянии справа от центра шара радиус светового пучка, вышедшего из шара, будет равен радиусу шара? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,26]

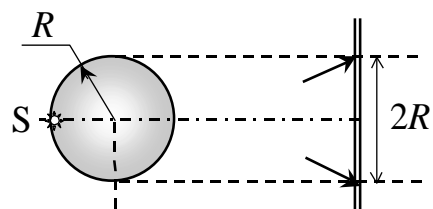


Рис. 7.44

**7.8.9.** Собирающая линза увеличивает изображение предмета в 4 раза. Если этот предмет отодвинуть на 10 см от линзы, то увеличение уменьшится в 2 раза. Изображение в обоих случаях действительное. Определите фокусное расстояние линзы. Ответ представьте в метрах. [0,4]

**7.8.10.** На расстоянии 1 м от собирающей линзы поставлен подсвечивающий предмет. Если линзу передвинуть на 30 см от предмета, площадь резкого изображения становится равной  $9/16$  площади предмета. Определите оптическую силу линзы. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [1,8]

**7.8.11.** От предмета высотой 20 см при помощи линзы получили действительное изображение высотой 80 см. Когда предмет передвинули на 5 см, получили действительное изображение высотой 40 см. Определите фокусное расстояние линзы. Ответ представьте в сантиметрах. [20]

**7.8.12.** Линзу, дающую действительное изображение предмета, передвинули на расстояние, равное ее фокусному расстоянию. При этом получилось мнимое изображение того же размера. Найдите увеличение линзы. [2]

**7.8.13.** Объектив проекционного аппарата с фокусным расстоянием 0,15 м расположен на расстоянии 4,65 м от экрана. Определите площадь изображения на экране, если площадь диапозитива равна  $4,32 \text{ см}^2$ . Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,39]

**7.8.14.** Точечный источник (рис. 7.45) движется по дуге окружности со скоростью 3 см/с вокруг главной оптической оси собирающей линзы в плоскости, перпендикулярной этой оси и отстоящей от линзы на расстоянии  $1,5 F$ , где  $F$  – фокусное расстояние линзы. С какой скоростью движется изображение источника? Ответ представьте в сантиметрах за секунду. [6]

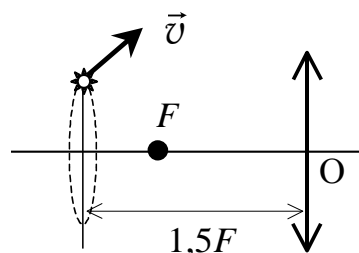


Рис. 7.45

**7.8.15.** Точка А движется с постоянной скоростью 2 см/с в направлении, как показано на рис. 7.46. С какой скоростью движется изображение этой точки, если расстояние этой точки от линзы 0,15 м, а фокусное расстояние линзы 0,1 м? Ответ представьте в сантиметрах за секунду. [4]

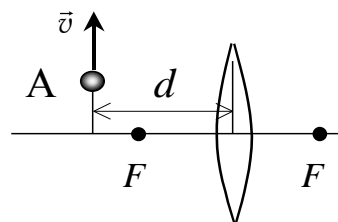


Рис. 7.46

**7.8.16.** Расстояние от предмета до экрана равно 100 см. Тонкая линза, помещенная между ними, дает на экране увеличенное изображение предмета. Если линзу переместить на 32 см, то на экране получится уменьшенное изображение. Каково фокусное расстояние линзы? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,22]

**7.8.17.** На некотором расстоянии от тонкой собирающей линзы помещен предмет. На экране при этом получено его четкое изображение. Линейное увеличение полученного изображения равно 2. Затем предмет был удален от линзы на расстояние 1 м от своего предыдущего положения. Передвинув экран, вновь получили четкое изображение, причем линейное увеличение оказалось равным 1. Определите фокусное расстояние линзы. Ответ представьте в единицах СИ. [2]

**7.8.18.** \*На оптической скамье установлена лампочка  $L$ , которую можно считать точечным источником света, рис. 7.47. От лампочки отодвигают с постоянной скоростью  $v_0$ , равной 1 м/с, собирающую линзу. С какой скоростью и в какую сторону будет двигаться изображение  $L'$  лампочки относительно Земли в тот момент, когда линза окажется от нее на расстоянии  $1,5 F$ , где  $F$  – фокусное расстояние линзы? Лампочка все время остается на главной оптической оси линзы. Ответ представьте в единицах СИ. [– 3; влево]

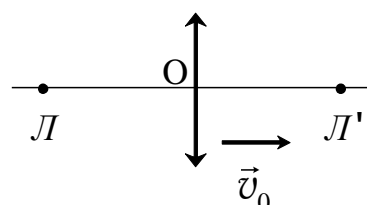


Рис. 7.47

**7.8.19.** Стальной шарик падает без начальной скорости с высоты  $h$ , равной 0,9 м, на собирающую линзу и разбивает ее (рис. 7.48). В начальный момент расстояние от шарика до линзы равнялось расстоянию от линзы до действительного изображения шарика. Сколько времени существовало мнимое изображение? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,12]

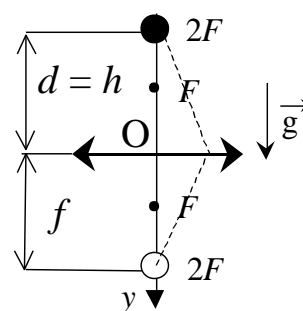


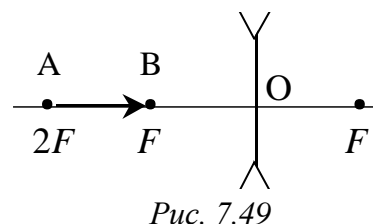
Рис. 7.48

**7.8.20.** Оптическая система состоит из двух собирающих линз с фокусными расстояниями 20 см и 10 см. Расстояние между линзами 30 см. Предмет находится на расстоянии 30 см от первой линзы. Определите, на каком расстоянии от второй линзы находится изображение предмета. Ответ представьте в единицах СИ. [0,075]



**7.8.21.** Точечный источник света помещен на главной оптической оси собирающей линзы  $L_1$  с фокусным расстоянием 20 см на расстоянии 40 см от этой линзы. По другую сторону линзы  $L_1$  в ее фокальной плоскости помещена рассеивающая линза  $L_2$  так, что вышедшие из линзы  $L_2$  лучи кажутся исходящими из самого источника. Определите фокусное расстояние рассеивающей линзы. Ответ представьте в сантиметрах. [–15]

**7.8.22.** Найдите коэффициент увеличения изображения предмета АВ (рис. 7.49), даваемого тонкой рассеивающей линзой с фокусным расстоянием  $F$ . Ответ округлите до сотых. [0,17]

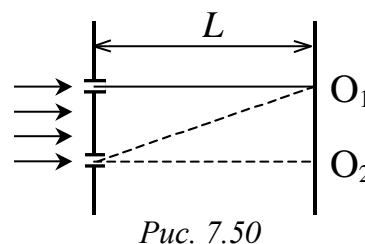


**7.8.23.** Расстояние между источником света и экраном 1 м. Тонкая линза, помещенная между ними, дает четкое изображение при двух положениях линзы, расстояние между которыми 0,4 м. Определите фокусное расстояние линзы. Ответ представьте в единицах СИ. [0,21]

**7.8.24.** Фотографируется момент погружения в воду прыгуна с вышки высотой 4,9 м. Фотограф находится у воды на расстоянии 10 м от места погружения. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата равно 20 см. На негативе допустимо «размытие» изображения не более 0,05 мм. На какое наибольшее время (в миллисекундах) должен быть открыт затвор фотоаппарата? [0,25]

**7.8.25.** Параллельный пучок света падает нормально на плосковыпуклую стеклянную линзу, лежащую выпуклой стороной на стеклянной пластинке. В отраженном свете наблюдаются кольца Ньютона. Проведя опыт в отраженном свете, измерили радиус третьего темного кольца Ньютона. Когда пространство между пластинкой и линзой заполнили жидкостью, то тот же радиус стало иметь кольцо с номером на единицу большим. Определите показатель преломления жидкости. Ответ округлите до сотых. [1,33]

**7.8.26.** \*Плоская монохроматическая волна нормально падает на экран с двумя параллельными щелями (рис. 7.50), расстояние между которыми 2,5 мм. Интерференционная картина наблюдается на другом экране, расположенном на расстоянии  $L$ , равном 5 м, от плоскости ще-



лей. На этом экране в точках  $O_1$  и  $O_2$  наблюдаются светлые интерференционные полосы первого порядка. На какое минимальное расстояние вдоль оси системы нужно сместить экран, чтобы в точках  $O_1$  и  $O_2$  наблюдались темные полосы? При решении принять во внимание, что  $\sqrt{1+\alpha} \approx 1 + \alpha/2$ , если  $\alpha \ll 1$ . Ответ представьте в единицах СИ. [1,67]

**7.8.27.** Капля воды объемом 0,1 мл нагревается светом с длиной волны 750 нм, поглощая  $7 \cdot 10^{10}$  фотонов в секунду. Определите скорость нагревания воды, считая, что вся энергия, полученная каплей, расходуется только на ее нагревание. Ответ представьте в кельвинах за секунду, умножьте на  $10^9$  и округлите до целого числа. [44]

**7.8.28.** Пучок лазерного излучения мощностью 100 Вт падает на непрозрачную пластинку под углом  $30^\circ$ . Пластинка поглощает 60 % падающей энергии, а остальную часть энергии зеркально отражает. Найдите величину силы нормального давления, действующей на пластинку со стороны света. Ответ представьте в наноньютонах и округлите до целого числа. [404]

**7.8.29.** Квант света, соответствующий длине волны  $5 \cdot 10^{-7}$  м, вырывает с поверхности металла фотоэлектрон, который описывает в однородном магнитном поле с индукцией  $10^{-3}$  Тл окружность радиусом 1 мм. Найдите работу выхода электронов из металла. Ответ представьте в электрон-вольтах и округлите до десятых. [2,4]

**7.8.30.** Плоский алюминиевый электрод освещается ультрафиолетовым светом с длиной волны 83 нм. На какое минимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода имеется задерживающее электрическое поле напряженностью 750 В/м? Красная граница фотоэффекта для алюминия равна 332 нм. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до десятых. [1,5]

**7.8.31.** На уединенный никелевый шарик радиусом 0,5 см падает свет с длиной волны 250 нм и выбивает из него некоторое количество фотоэлектронов. Сколько фотоэлектронов покинет шарик дополнительно, если на него дополнительно направить свет с длиной волны 200 нм? Ответ поделите на  $10^6$  и округлите до десятых. [4,3]

**7.8.32.** Излучение аргонового лазера с длиной волны 500 нм сфокусировано на плоском фотокатоде в пятно диаметром 0,1 мм. Работа выхо-

да электрона с поверхности фотокатода 2 эВ. На анод, расположенный на расстоянии 30 мм от катода, подано ускоряющее напряжение 4 кВ. Найдите диаметр пятна фотоэлектронов на аноде. Анод считать плоским и расположенным параллельно поверхности катода. Ответ представьте в миллиметрах и округлите до десятых. [1,3]

**7.8.33.** Для разгона космических аппаратов и коррекции их орбит предложено использовать солнечный парус – скрепленный с аппаратом легкий экран большой площади из тонкой пленки, которая зеркально отражает солнечный свет. Мощность солнечного излучения, падающего на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, составляет вблизи Земли  $1370 \text{ Вт/м}^2$ . Во сколько раз ближе к Солнцу, чем Земля, находится аппарат массой 200 кг (включая массу паруса), снабженный парусом площадью  $2,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ , если давление солнечных лучей сообщает ему ускорение  $10^{-3} \text{ м/с}^2$ ? Ответ округлите до сотых. [2,96]

**7.8.34.** В одном из проектов системы противоракетной обороны предлагалось вывести на орбиту химический лазер, создающий излучение мощностью  $2,52 \cdot 10^7 \text{ Вт}$ . Энергия и импульс каждого фотона этого излучения равны 1,875 эВ и  $10^{-24} \text{ г} \cdot \text{м/с}$  соответственно. Определите силу отдачи, действующую на лазер при его работе. Ответ представьте в миллиньютонках. [84]

**7.8.35.** Для увеличения яркости изображения слабых источников света используется вакуумный прибор – электронно-оптический преобразователь. В этом приборе фотоны, падающие на катод, выбивают из него фотоэлектроны, которые ускоряются разностью потенциалов 12 кВ и бомбардируют флуоресцирующий экран, рождающий вспышку света при попадании каждого электрона. Длина волны падающего на катод света 622 нм, а света, излучаемого экраном, 430 нм. Какое количество фотонов, падающих на катод, приходится на один выбитый фототрон, если прибор увеличивает энергию светового излучения, падающего на катод, в 1000 раз? Работу выхода электронов принять равной 1 эВ. Считать, что энергия электронов переходит в энергию света без потерь. Ответ округлите до целого числа. [6]

## 8. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

### Содержание раздела

Основы специальной теории относительности. Постулаты Эйнштейна: принцип относительности Эйнштейна, инвариантность скорости света. Длина отрезка и промежуток времени между двумя событиями в различных инерциальных системах отсчета. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистская масса и релятивистский импульс. Кинетическая энергия в релятивистской механике. Полная энергия. Энергия покоя. Связь массы и энергии.

Физика атома. Планетарная модель атома. Постулаты Бора. Поглощение и излучение энергии атомом. Линейчатые спектры. Спектральный анализ. Лазер.

Физика атомного ядра. Протонно-нейтронная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра. Законы сохранения зарядового и массового чисел ядра. Энергия связи нуклонов в ядре. Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Закон радиоактивного распада. Активность радиоактивного вещества. Деление и синтез ядер.

### Основные законы и формулы

#### *Элементы теории относительности*

- Релятивистская зависимость массы от скорости

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

где  $m$  – релятивистская масса тела,  $m_0$  – масса покоя тела,  $v$  – скорость движения тела,  $c$  – скорость света в вакууме.

- Релятивистский импульс тела

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

- Релятивистское замедление хода часов

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где  $\tau$  – время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами (собственное время),  $t$  – время, измеренное наблюдателем в лабораторной (условно неподвижной) системе отсчета.

- Релятивистское сокращение длины

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где  $l_0$  – длина тела, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело покоится (собственная длина),  $l$  – длина тела, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью  $v$ .

- Релятивистский закон сложения скоростей

$$u_2 = \frac{u_1 + v}{1 + u_1 v / c^2},$$

где  $u_2$  и  $u_1$  – скорости тела соответственно в лабораторной системе отсчета и в движущейся относительно неё со скоростью  $v$ .

- Взаимосвязь массы и энергии

$$W = mc^2,$$

где  $W$  – полная энергия тела,  $m$  – масса тела,  $c$  – скорость света в вакууме.

- Энергия покоя тела

$$W_0 = m_0 c^2,$$

где  $m_0$  – масса покоя тела.

- Изменение массы тела  $\Delta m$  при изменении полной энергии ( $\Delta W$ ) этого тела

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2.$$

- Кинетическая энергия релятивистской частицы:

$$W_{\text{кин}} = W - W_0, \quad W_{\text{кин}} = mc^2 - m_0 c^2,$$

где  $W$  – полная энергия тела,  $W_0$  – энергия покоя тела.

### ***Атом водорода по теории Бора***

- Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых атом не излучает энергию. В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, имеет дискретные (квантованные) значения момента импульса.

- Для атома водорода

$$m_e v r_n = n \hbar,$$

где  $m_e$  – масса электрона,  $v$  – скорость электрона на  $n$ -й стационарной орбите радиуса  $r_n$ ,  $n$  – главное квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  – постоянная Планка.

- Радиус  $n$ -й стационарной орбиты атома водорода

$$r_n = \frac{\hbar^2}{km_e e^2} n^2, \quad r_n = r_1 \cdot n^2, \quad \text{где } r_1 = \frac{\hbar^2}{km_e e^2},$$

где  $m_e$ ,  $e$  – масса и заряд электрона соответственно,  $r_1$  – радиус первой стационарной орбиты (первый боровский радиус,  $r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11}$  м),  $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$  м/Ф.

- Энергия  $E_n$  электрона на  $n$ -й стационарной орбите атома водорода

$$E_n = E_1 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad \text{где } E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}.$$

Здесь  $E_1$  – энергия основного состояния атома ( $n = 1$ ),  $E_1 = -13,6$  эВ.

- Второй постулат Бора (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m,$$

где  $h\nu_{nm}$  – энергия фотона, излучаемая или поглощаемая атомом,  $E_n$ ,  $E_m$  – энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения). При  $n > m$  – излучение кванта света, а при  $n < m$  – поглощение кванта света.

- Формула Бальмера (для видимой области спектра)

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $\lambda$  и  $\nu$  – соответственно длина волны и частота спектральной линии в спектре атома водорода ( $n = 3, 4, 5, \dots$ ),  $R'$  и  $R$  – постоянная Ридберга ( $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ,  $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ),  $c$  – скорость света в вакууме.

### Атомное ядро

- Символическая запись ядра  ${}^A_Z X$ ,

где  $X$  – химический элемент,  $A = Z + N$  – массовое число, число нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре,  $Z$  – атомный номер элемента в таблице Менделеева (число протонов в ядре, число электронов в оболочке атома),  $N$  – число нейтронов в ядре.

- Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2,$$

где  $\Delta m$  – дефект массы ядра,  $c$  – скорость света в вакууме.

- Дефект массы ядра

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}},$$

где  $m_p$  – масса покоя протона,  $m_n$  – масса покоя нейтрона,  $M_{\text{я}}$  – масса ядра.

- Удельная энергия связи ядра

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A},$$

где  $A$  – число нуклонов (общее число протонов и нейтронов) в ядре.

- Закон радиоактивного распада

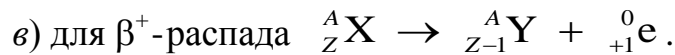
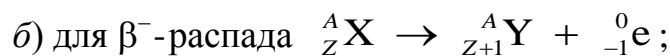
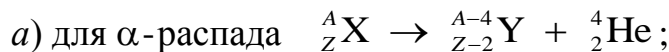
$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $N_0$  – первоначальное число ядер (число ядер при  $t = 0$ ),  $T_{1/2}$  – период полураспада,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада,  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ ,  $\tau = 1 / \lambda$  – среднее время жизни радиоактивного ядра.

- Число  $\Delta N$  ядер, распавшихся за время  $t$ ,

$$\Delta N = N_0 - N, \quad \Delta N = N_0 \cdot \left( 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right), \quad \Delta N = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t}).$$

- Правила смещения при радиоактивном распаде



Здесь  $\text{Y}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^0_{-1}\text{e}$ ,  ${}^0_{+1}\text{e}$  – ядро, возникшее в процессе радиоактивного распада,  $\alpha$  – частица, электрон и позитрон соответственно.

- Энергия (тепловой эффект) ядерной реакции

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] \cdot c^2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы,  $(m_3 + m_4)$  – сумма масс покоя ядер продуктов реакции,  $c$  – скорость света в вакууме.

Если  $(m_1 + m_2) > (m_3 + m_4)$ , то энергия освобождается, энергетический эффект положителен, реакция экзотермическая.

Если  $(m_1 + m_2) < (m_3 + m_4)$ , то энергия поглощается, энергетический эффект отрицателен, реакция эндотермическая.

- Энергия ядерной реакции может быть записана также в виде

$$Q = (E_1 + E_2) - (E_3 + E_4),$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – энергии покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы,  $E_3$  и  $E_4$  – энергии покоя ядра и частицы – продуктов реакции.

## Примеры решения задач

**8.1. Релятивистское изменение интервалов времени.** Собственное время жизни  $t_0$  частицы (время жизни в системе отсчета, в которой частица покоится) равно  $2 \cdot 10^{-8}$  с. Частица с момента своего рождения до распада (превращения в другие частицы) в лабораторной системе отсчета пролетела расстояние 300 м. На сколько процентов скорость частицы меньше скорости света в вакууме? Ответ округлите до сотых.

Д а н о :  $t_0 = 2 \cdot 10^{-8}$  с;  $s = 300$  м;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $\frac{c-v}{v} \cdot 100\%$ .

**Решение.** Разность между скоростью частицы  $v$  и скоростью света  $c$  обозначим  $\Delta v = c - v$ . С учетом этого, в задаче требуется найти

$$\frac{\Delta v}{v} \cdot 100\% = \left( \frac{c-v}{v} \right) \cdot 100\% = \left( \frac{c}{v} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Таким образом, задача сводится к определению скорости частицы  $v$ . Запишем формулу, связывающую собственное время  $t_0$  жизни частицы и время  $t$  движения частицы в лабораторной системе отсчета, например, в системе отсчета, связанной с Землей,

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

С другой стороны,  $t = s/v$ . Таким образом,

$$\frac{s}{v} = \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Отсюда находим

$$v = \frac{c \cdot s}{\sqrt{c^2 t_0^2 + s^2}} \quad \text{или} \quad \frac{c}{v} = \sqrt{(ct_0/s)^2 + 1}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим:

$$\left( \frac{c-v}{v} \right) \cdot 100\% = \left( \sqrt{(ct_0/s)^2 + 1} - 1 \right) \cdot 100\% \approx 0,02\%.$$

**8.2. Релятивистское сокращение длины.** В системе отсчета, движущейся вдоль линии горизонта со скоростью  $v = 0,6c$ , покоится стержень, образующий угол  $\varphi_0 = 35^\circ$  с направлением движения системы. Определите угол  $\varphi$  наклона стержня по отношению к горизонту, изме-



ренный земным наблюдателем. Ответ представьте в градусах и округлите до целого числа

Дано:  $v = 0,6c$ ,  $\varphi_0 = 35^\circ$ .

Определить  $\varphi$ .

**Решение.** Пусть в  $K'$ -системе, движущейся в направлении оси  $O'x'$  относительно Земли со скоростью  $v$ , в плоскости  $x'O'y'$  покоится стержень (рис. 8.1a). Из рис. 8.1a следует, что

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{\Delta y'}{\Delta x'}. \quad (1)$$

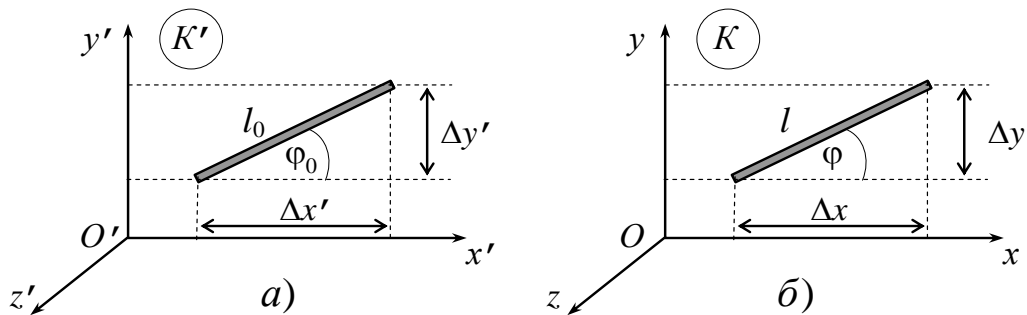


Рис.8.1

В системе  $K$  (рис. 8.1б), относительно которой стержень движется,

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (2)$$

Учтем, что при переходе от системы  $K'$  к системе  $K$  размеры стержня в направлении оси  $Oy$  не изменяются, т.е.  $\Delta y' = \Delta y$ . Тогда, на основе (1) и (2), можно записать следующее соотношение

$$\Delta x \operatorname{tg}\varphi = \Delta x' \operatorname{tg}\varphi_0, \quad (3)$$

откуда

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}\varphi_0 \frac{\Delta x'}{\Delta x}. \quad (4)$$

Однако в системе  $K$ , относительно которой стержень движется, его размеры в направлении оси  $Ox$  претерпевают релятивистское сокращение, т.е.

$$\Delta x = \Delta x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и сокращая на  $\Delta x'$ , получим:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{tg}\varphi_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

или 
$$\varphi = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right) \approx 41^\circ.$$

**8.3. Релятивистский закон сложения скоростей.** Ускоритель сообщил радиоактивному ядру скорость  $v = 0,5c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. В момент вылета из ускорителя ядро выбросило в направлении своего движения  $\beta$ -частицу со скоростью  $v_x = 0,9c$  относительно ускорителя. Определите скорость  $v_{x'}$  частицы относительно ядра. Ответ представьте в мегаметрах за секунду. Ответ округлите до целого числа.

Д а н о :  $v = 0,5c$ ,  $v_x = 0,9c$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $v_{x'}$ .

**Решение.** Для решения задачи используем релятивистский закон сложения скоростей:

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + v_{x'}v/c^2}. \quad (1)$$

Согласно условию задачи, в этой формуле  $v_x$  – скорость  $\beta$ -частицы в лабораторной системе отсчета, связанной с ускорителем,  $v_{x'}$  – скорость  $\beta$ -частицы в системе отсчета, связанной с радиоактивным ядром,  $v$  – скорость системы отсчета, связанной с радиоактивным ядром, относительно лабораторной системы отсчета, связанной с ускорителем. Так как все движения происходят в одном направлении, например, слева направо, то в формуле (1) в числителе нужно ставить знак “плюс”. Выражая из (1)  $v_{x'}$  и подставляя затем в полученную формулу числовые данные, получим

$$v_{x'} = \frac{v_x - v}{1 - v_x v/c^2} \approx 218 \text{ Мм/с}.$$

**8.4. Релятивистская масса.** На сколько процентов релятивистская масса  $m$  частицы, движущейся со скоростью  $v = 2 \cdot 10^8$  м/с, больше массы покоя  $m_0$ ? Ответ округлите до десятых.

Д а н о :  $v = 2 \cdot 10^8$  м/с,  $c = 2 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100\%$ .

**Решение.** Релятивистская масса  $m$  и масса покоя  $m_0$  частицы связаны формулой

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

Учтем, что  $\Delta m = m - m_0$ . Тогда

$$\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100\% = \frac{1}{m_0} \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 \right) \cdot 100\%$$

или

$$\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100\% = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \cdot 100\% \approx 15,5\%.$$

**8.5. Релятивистский импульс.** Импульс  $p$  релятивистской частицы равен  $m_0 v$ , где  $m_0$  – масса покоя частицы. Определите скорость  $v$  частицы. Ответ представьте в мегаметрах в секунду и округлите до целого числа.

Д а н о :  $p = m_0 c$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $v$ .

**Решение.** Импульс релятивистской частицы определяется в соответствии с формулой

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Согласно условию задачи,  $p = m_0 c$ . Тогда

$$m_0 v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) находим:

$$v = \frac{c}{\sqrt{2}} \approx 212 \text{ м/с}.$$

**8.6. Скорость и кинетическая энергия релятивистской частицы.** Какова скорость  $v$  протона после сообщения ему кинетической энергии  $E_{кр} = 10$  МэВ в циклическом ускорителе – циклотроне? Ответ представьте в мегаметрах в секунду и округлите до целого числа.

Д а н о :  $E_{кр} = 10$  МэВ;  $m_0 c^2 = 938,3$  МэВ;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $v$ .

**Решение.** Скорость протона определим из формулы кинетической энергии релятивистской частицы

$$E_{\text{кр}} = \frac{m_{0\text{p}}c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_{0\text{p}}c^2 \quad \Rightarrow \quad \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_{0\text{p}}c^2}{E_{\text{кр}} + m_{0\text{p}}c^2}, \quad (1)$$

где  $m_{0\text{p}}$  – масса покоя протона,  $m_{0\text{p}}c^2$  – энергия покоя протона,  $c$  – скорость света в вакууме.

После возведения обеих частей (1) в квадрат, получим

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{m_{0\text{p}}^2 c^4}{(E_{\text{кр}} + m_{0\text{p}}c^2)^2}. \quad (2)$$

Из (2), выполнив необходимые алгебраические преобразования и подстановку числовых данных, находим скорость протона после сообщения ему кинетической энергии  $E_{\text{кр}}$ :

$$v = c \cdot \frac{\sqrt{E_{\text{кр}}(2m_{0\text{p}}c^2 + E_{\text{кр}})}}{m_{0\text{p}}c^2 + E_{\text{кр}}} \approx 43 \text{ Мм/с}.$$

**8.7. Скорость и кинетическая энергия релятивистской частицы.** При какой скорости  $v$  кинетическая энергия любой частицы вещества равна её энергии покоя? Ответ округлите до целого числа.

Д а н о :  $E_{\text{к}} = E_0$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ с}$ .

О п р е д е л и т ь  $v$ .

**Решение.** Кинетическая энергия  $E_{\text{к}}$  релятивистской частицы равна разности её полной энергии  $E$  и энергии покоя  $E_0$

$$E_{\text{к}} = E - E_0. \quad (1)$$

Так как по условию задачи  $E_{\text{к}} = E_0$ , то заменив в (1)  $E_{\text{к}}$  на  $E_0$ , получим

$$E = 2E_0, \quad (2)$$

где полная энергия частицы

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим:

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = 2E_0$$

откуда  $v = \sqrt{0,75} \cdot c \approx 260 \text{ Мм/с}$ .

### 8.8. Изменение кинетической энергии релятивистской частицы.

Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы его скорость изменилась от 60 % скорости света до 80 %? Ответ представьте в мегавольтах и округлите до целого числа.

Д а н о :  $v_1 = 0,6c$ ,  $v_2 = 0,8c$ ,  $m_{0p} = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

О п р е д е л и т ь  $U$ .

**Решение.** Кинетическая энергия, приобретаемая заряженной частицей в электрическом поле,

$$\Delta E_k = qU, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд протона.

Так как скорости  $v_1$  и  $v_2$  движения протона сопоставимы со скоростью света  $c$ , то движение релятивистское. Кинетическая энергия протона при релятивистском движении определяется по формуле

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Тогда изменение  $\Delta E_k$  кинетической энергии

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = m_{0p}c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v_2^2/c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}} \right). \quad (2)$$

Приравнивая правые части уравнений (1) и (2) и произведя вычисления, получим:

$$U = \frac{m_{0p}c^2}{q} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v_2^2/c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}} \right) \approx 392 \text{ МВ}.$$

**8.9. Первый постулат Бора.** Определите скорость электрона на второй ( $n = 2$ ) стационарной орбите атома водорода. Ответ представьте в мегаметрах в секунду и округлите до десятых.

Д а н о :  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $n = 2$ .

О п р е д е л и т ь  $v$ .

**Решение.** Согласно первому постулату Бора, электрон в атоме водорода, не теряя энергии, вращается по круговым, стационарным орбитам. Момент импульса электрона на этих орбитах принимает дискретные (квантованные) значения

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

где  $m$  – масса электрона,  $v_n$  – скорость электрона на  $n$ -й орбите,  $r_n$  – радиус  $n$ -й орбиты,  $h$  – постоянная Планка.

Сила взаимодействия электрона с ядром, заряд которого равен заряду электрона, определяется законом Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2}.$$

Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение

$$a_{\text{цс}} = \frac{v_n^2}{r_n}.$$

Следовательно, второй закон Ньютона для движения электрона по  $n$ -й стационарной орбите можно записать в виде

$$\frac{m v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2}.$$

Отсюда находим  $r_n$

$$r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m v_n^2}. \quad (2)$$

Решая совместно (1) и (2) относительно скорости электрона, движущегося в атоме водорода по  $n$ -й стационарной, круговой, орбите, найдем

$$v_n = \frac{e^2}{2n\epsilon_0 h} \approx 1,1 \text{ Мм/с}.$$

**8.10. Второй постулат Бора.** Атом водорода может находиться в основном состоянии с энергией  $E_1 = -13,6$  эВ и в возбужденных состояниях с энергиями  $E_2 = -3,4$  эВ и  $E_3 = -1,51$  эВ. Во сколько раз энергия фотона, испущенного при переходе атома из первого возбужденного состояния в основное, больше энергии фотона, испущенного при переходе атома из второго возбужденного состояния в первое возбужденное состояние? Ответ округлите до десятых.

Д а н о :  $E_1 = -13,6$  эВ,  $E_2 = -3,4$  эВ,  $E_3 = -1,51$  эВ.

О п р е д е л и т ь  $\epsilon_1/\epsilon_2$ .

**Решение.** Согласно второму постулату Бора, при переходе атома из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает квант  $\varepsilon = h\nu_{nm}$  электромагнитного излучения (фотон)

$$\varepsilon = h\nu_{nm} = E_n - E_m, \quad (1)$$

где  $E_n$  и  $E_m$  – энергии начального и конечного стационарных состояний атома,  $\nu_{nm}$  – частота излучения,  $h$  – постоянная Планка. В частности, при излучении фотона  $E_n > E_m$ . Поэтому, в соответствии с условием задачи и формулой (1), имеем

$$\varepsilon_1 = E_2 - E_1, \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = E_3 - E_2, \quad (3)$$

где  $E_2$  и  $E_3$  – энергии первого и второго возбужденных состояний атома соответственно,  $E_1$  – энергия основного состояния атома.

Поделив почленно (2) на (3), получим:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{E_2 - E_1}{E_3 - E_2} \approx 5,4.$$

**8.11. Второй постулат Бора.** На рис.8.2 изображены несколько энергетических уровней атома. Минимальная длина волны света, излучаемого при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , равна 210 нм. Известно, что частоты переходов относятся друг к другу как  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ . Какова длина световой волны с частотой  $\nu_{32}$ ? Ответ представьте в нанометрах.

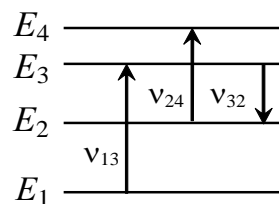


Рис. 8.2

Д а н о :  $\lambda_{\min} = 210$  нм,  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ .

О п р е д е л и т ь  $\lambda_{32}$ .

**Решение.** Минимальная длина  $\lambda_{\min}$  световой волны, излучаемой атомом, соответствует переходу с уровня  $E_4$  на уровень  $E_1$  ( $\lambda_{\min} = \lambda_{41}$ ), так как этот переход соответствует максимальной энергии излученного кванта.

Учтем также, что частоты фотонов при испускании и поглощении излучения между соответствующими уровнями энергии одинаковы. Тогда, на основе схемы энергетических уровней атома, представленной на рис.8.2, можно написать следующее соотношение между частотами излучения и поглощения:

$$\nu_{41} = \nu_{13} + \nu_{24} - \nu_{32}$$

откуда  
или

$$\nu_{32} = \nu_{13} + \nu_{24} - \nu_{41}$$

$$\frac{c}{\lambda_{32}} = \nu_{13} + \nu_{24} - \frac{c}{\lambda_{\min}}. \quad (1)$$

Частоту перехода  $\nu_{13}$  определим из соотношения  $\nu_{13} : \nu_{32} = 9 : 4$ , откуда

$$\nu_{13} = \frac{9}{4} \nu_{32} = \frac{9}{4} \frac{c}{\lambda_{32}}. \quad (2)$$

Частоту перехода  $\nu_{24}$  определим из соотношения  $\nu_{24} : \nu_{32} = 7 : 4$ , откуда

$$\nu_{24} = \frac{7}{4} \nu_{32} = \frac{7}{4} \frac{c}{\lambda_{32}}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) и решая полученное уравнение относительно  $\lambda_{32}$ , получим:

$$\lambda_{32} = 3\lambda_{\min} = 630 \text{ нм}.$$

**8.12. Состав атомного ядра.** Сколько протонов и нейтронов содержит ядро изотопа висмута  ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ ?

Д а н о : ядро  ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ .

О п р е д е л и т ь  $Z, N$ .

**Решение.** Символически ядро химического элемента принято обозначать в виде  ${}^A_Z\text{X}$ . Символ  $Z$  указывает на атомный номер элемента в таблице Менделеева и число протонов в ядре, символ  $A = Z + N$  – массовое число, равное сумме числа протонов  $Z$  и числа нейтронов  $N$  в ядре. Следовательно, в указанном ядре изотопа  ${}_{83}^{212}\text{Bi}$  количество протонов  $Z = 83$ , а количество нейтронов  $N = A - Z = 212 - 83 = 129$ .

**8.13. Дефект массы и энергия связи атомного ядра.** Определите энергию связи  $E_{\text{св}}$  (в мегаэлектронвольтах), удельную энергию связи  $E_{\text{уд}}$  (в мегаэлектронвольтах на нуклон) и дефект массы  $\Delta m$  (в атомных единицах массы) ядра бериллия  ${}^7_4\text{Be}$ . Ответ округлите:  $E_{\text{уд}}$  – до тысячных,  $\Delta m$  – до сотых.

Д а н о : ядро  ${}^7_4\text{Be}$ ,  $Z = 4$ ,  $N = 3$ ,  $E_p = 938,3$  МэВ,  $E_n = 939,6$  МэВ,  $E_{\text{я}} = 6534,24$  МэВ.

О п р е д е л и т ь  $E_{\text{св}}$ ,  $E_{\text{уд}}$ ,  $\Delta m$ .



**Решение.** Энергия связи  $E_{\text{св}}$  ядра равна минимальной работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны – нейтроны и протоны. Энергия связи равна разности между суммарной энергией покоя всех нуклонов и энергией покоя ядра

$$E_{\text{св}} = Z \cdot E_p + (A - Z) \cdot E_n - E_{\text{я}}.$$

Подставляя числовые данные в эту формулу, находим, что для ядра  ${}^7_4\text{Be}$

$$E_{\text{св}} = 37,76 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи есть энергия связи, приходящаяся на один нуклон,

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} \approx 5,394 \text{ МэВ/нуклон}.$$

Дефект массы и энергия связи ядра связаны соотношением

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2.$$

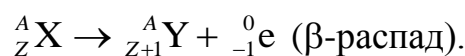
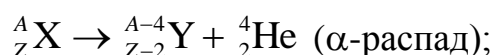
Отсюда  $\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2} \approx 0,06713 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 0,04044 \text{ а.е.м.}$

**8.14. Радиоактивность.** Ядро нептуния  ${}^{237}_{93}\text{Np}$ , испытав серию  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов, превратилось в ядро висмута  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ . Определите общее количество  $n$   $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов.

Д а н о : ядро  ${}^{237}_{93}\text{Np}$ ,  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ ,  $A_{\text{Np}} = 237$ ,  $A_{\text{Bi}} = 209$ ,  $Z_{\text{Np}} = 93$ ,  $Z_{\text{Bi}} = 83$ .

О п р е д е л и т ь  $n = n_{\alpha} + n_{\beta}$ .

**Решение.** С учетом законов сохранения зарядового  $Z$  и массового  $A$  чисел символические схемы  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов могут быть представлены в виде



При  $\alpha$ -распаде массовое число  $A$  уменьшается на 4 единицы, а зарядовое  $Z$  – на 2 единицы. Следовательно, количество  $n_{\alpha}$   $\alpha$ -распадов в процессе превращения ядра  ${}^{237}_{93}\text{Np}$  в ядро  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$

$$n_{\alpha} = \frac{A_{\text{Np}} - A_{\text{Bi}}}{A_{\text{He}}} = \frac{237 - 209}{4} = 7.$$

Если бы в данном процессе происходило только 7  $\alpha$ -распадов, то зарядовое число  $Z$  конечного ядра было бы равно 79:

$$Z = Z_{\text{Np}} - 7 \cdot Z_{\text{He}} = 93 - 7 \cdot 2 = 79.$$

Однако зарядовое число конечного ядра равно 83. Это означает, что в данном процессе радиоактивных превращений произошло 4  $\beta$ -распада:

$$n_{\beta} = Z_{\text{Bi}} - Z = 83 - 79 = 4,$$

так как при каждом  $\beta$ -распаде зарядовое число увеличивается на единицу.

Таким образом, общее число  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов в процессе превращения ядра нептуния  ${}^{237}_{93}\text{Np}$ , в ядро висмута  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$

$$n = n_{\alpha} + n_{\beta} = 7 + 4 = 11.$$

**8.15. Закон радиоактивного распада.** Во сколько раз число  $\Delta N_1$  распадов ядер актиния  ${}^{225}\text{Ac}$  в течение первых пяти суток больше числа  $\Delta N_2$  распадов в течение вторых пяти суток? Период полураспада  $T_{1/2}$   ${}^{225}\text{Ac}$  равен 10 сут. Ответ округлите до десятых.

Д а н о :  ${}^{225}\text{Ac}$ ,  $T_{1/2} = 10$  сут,  $t = 5$  сут.

О п р е д е л и т ь  $\Delta N_1/\Delta N_2$ .

**Решение.** Количество распадов  $\Delta N_1$  в течение первых пяти суток

$$\Delta N_1 = N_0 - N_1. \quad (1)$$

Количество распадов  $\Delta N_2$  в течение вторых пяти суток

$$\Delta N_2 = N_1 - N_2. \quad (2)$$

Здесь  $N_0$  и  $N_1$  – количество ядер актиния-225 к началу первых и вторых пяти суток соответственно,  $N_2$  – количество ядер актиния-225 к исходу вторых пяти суток.

Согласно закону радиоактивного распада,

$$N_1 = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}; \quad N_2 = N_1 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad (3)$$

где  $t$  – время, равное продолжительности радиоактивного распада (в нашем случае оно равно 5 сут),  $T_{1/2}$  – период полураспада.

Подставляя (3) в (1) и (2), получим

$$\Delta N_1 = N_0 - N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \left( 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right), \quad (4)$$

$$\Delta N_2 = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} - N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \left( 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right). \quad (5)$$

Поделив почленно (4) на (5) получим:

$$\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = 2^{\frac{t}{T_{1/2}}} \approx 1,4.$$

**8.16. Энергетический выход ядерной реакции.** Определите энергетический выход  $Q$  следующей ядерной реакции:  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ . Ответ представьте в мегаэлектронвольтах. Ядро-мишень  ${}^9_4\text{Be}$  неподвижно.

Д а н о : ядерная реакция  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ ,  $E_{{}^9_4\text{Be}} = 8392,8$  МэВ,  $E_{{}^2_1\text{H}} = 1875,6$  МэВ,  $E_{{}^{10}_5\text{B}} = 9324,4$  МэВ,  $E_n = 939,6$  МэВ.

О п р е д е л и т ь  $Q$ .

**Решение.** Для определения энергетического выхода ядерной реакции используем закон сохранения релятивистской полной энергии

$$E_{\text{Be}} + E_{\text{H}} = E_{\text{B}} + E_{\text{n}}. \quad (1)$$

Релятивистская полная энергия  $E$  частицы равна сумме ее энергии покоя  $m_0c^2$  и кинетической энергии  $E_{\text{к}}$

$$E = m_0c^2 + E_{\text{к}}. \quad (2)$$

Так как ядро бериллия  ${}^9_4\text{Be}$  неподвижно, то уравнение (1) с учетом (2) примет вид

$$m_{0(\text{Be})}c^2 + m_{0(\text{H})}c^2 + E_{\text{к}(\text{H})} = m_{0(\text{B})}c^2 + E_{\text{к}(\text{B})} + m_{0(\text{n})}c^2 + E_{\text{к}(\text{n})}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{к}(\text{H})}$ ,  $E_{\text{к}(\text{B})}$ ,  $E_{\text{к}(\text{n})}$  – кинетическая энергия дейтерия, бора и нейтрона соответственно.

Так как энергетический выход  $Q$  ядерной реакции есть разность между суммой кинетических энергий продуктов реакции и кинетической энергией налетающего ядра, то, как это следует из (3), имеем

$$Q = E_{\text{к}(\text{B})} + E_{\text{к}(\text{n})} - E_{\text{к}(\text{H})} = (m_{0(\text{Be})}c^2 + m_{0(\text{H})}c^2) - (m_{0(\text{B})}c^2 + m_{0(\text{n})}c^2). \quad (4)$$

Правая часть уравнения (4) представляет сумму энергий покоя ядра-мишени (бериллий) и бомбардирующей частицы (дейтерий) и сумму энергий покоя ядер продуктов реакции (бор и нейтрон).

Следовательно, энергетический выход данной ядерной реакции можно представить в виде

$$Q = (E_{0(\text{Be})} + E_{0(\text{H})}) - (E_{0(\text{B})} + E_{0(\text{n})}). \quad (5)$$

Подставляя числовые данные в формулу (5) и произведя вычисления, получим

$$Q = 4,4 \text{ МэВ}.$$

**8.17. Энергетический выход ядерной реакции.** Неподвижное ядро урана  ${}^{237}_{92}\text{U}$  претерпевает  $\alpha$ -распад. Определите энергетический выход  $Q$  данной реакции, если кинетическая энергия  $E_{\text{к}(\text{Th})}$  образовавшегося ядра тория равна  $0,07254$  МэВ. Считать, что скорости движения частиц

много меньше скорости света в вакууме. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до сотых.

Д а н о :  $E_{\text{к(Th)}} = 0,073 \text{ МэВ}$ ,  $m_{0(\text{He})} = 4,0015 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_{\text{Th}} = 233 \text{ а.е.м.}$ .

О п р е д е л и т ь  $Q$ .

**Решение.** Представим символическую запись  $\alpha$ -распада ядра  ${}^{237}_{92}\text{U}$



В результате  $\alpha$ -распада освобождается энергия  $Q$ , определяемая как сумма кинетических энергий ядра тория  ${}^{233}_{90}\text{Th}$  и  $\alpha$ -частицы (ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ ).

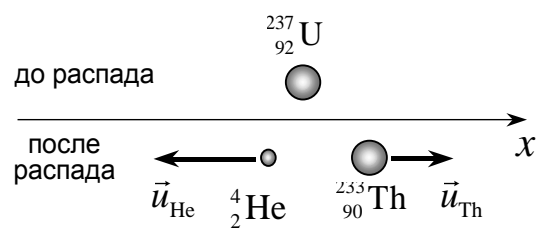


Рис. 8.3

$$Q = E_{\text{к(Th)}} + E_{\text{к(He)}}. \quad (2)$$

Для определения кинетической энергии  $\alpha$ -частицы определим вначале ее скорость  $u_{\text{He}}$  из закона сохранения импульса в проекции на ось  $x$ , (рис. 8.3)

$$m_{0(\text{Th})}u_{\text{Th}} - m_{0(\text{He})}u_{\text{He}} = 0 \quad \Rightarrow \quad u_{\text{He}} = \frac{m_{0(\text{Th})}u_{\text{Th}}}{m_{0(\text{He})}}. \quad (3)$$

Кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы:

$$E_{\text{к(He)}} = \frac{m_{0(\text{He})}u_{\text{He}}^2}{2} = \frac{m_{0(\text{He})}}{2} \cdot \frac{m_{0(\text{Th})}^2 u_{\text{Th}}^2}{m_{0(\text{He})}^2} = \frac{m_{0(\text{Th})}}{m_{0(\text{He})}} E_{\text{к(Th)}}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и произведя вычисления, получим:

$$Q = \left( 1 + \frac{m_{0(\text{Th})}}{m_{0(\text{He})}} \right) \cdot E_{\text{к(Th)}} \approx 4,25 \text{ МэВ}.$$

**8.18. Реакция деления ядер урана.** Определите электрическую мощность  $P_{\text{эл}}$  атомной электростанции, расходующей  $m = 0,1 \text{ кг}$  урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  в сутки, если КПД  $\eta$  станции равен 16 %. Принять, что при делении одного ядра урана-235 освобождается энергия  $\varepsilon = 200 \text{ МэВ}$ . Ответ представьте в мегаваттах и округлите до целого числа.

Д а н о : уран  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  $m = 0,1 \text{ кг}$ ,  $t = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$ ,  $\varepsilon = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ ,  $\eta = 0,16$ ,  $M = 0,235 \text{ кг/моль}$ ,  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

О п р е д е л и т ь  $P_{\text{эл}}$ .

**Решение.** Электрическую мощность  $P_{\text{эл}}$  атомной электростанции найдем по формуле

$$P_{\text{эл}} = \eta P_{\text{тепл}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{тепл}}$  – тепловая мощность атомной электростанции.

Тепловая мощность определяется скоростью освобождения тепловой энергии при делении ядер урана-235

$$P_{\text{тепл}} = Q/t, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемой в ядерном реакторе в течение времени  $t$ . Это количество теплоты представим в виде

$$Q = N \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

где  $N$  – количество ядер урана-235, испытавших деление в течение времени  $t$ .

Определим это количество ядер по формуле

$$N = \frac{m}{M} N_A, \quad (4)$$

где  $m$  – масса урана-235,  $M$  – его молярная масса,  $N_A$  – число Авогадро.

Подставляя последовательно (4) в (3), (3) в (2) и (2) в (1) и, производя вычисления, найдем электрическую мощность  $P_{\text{эл}}$  атомной электростанции

$$P_{\text{эл}} = \frac{\eta \varepsilon m N_A}{M t} \approx 15 \text{ МВт}.$$

## Задачи для самостоятельного решения

### 8.1.

**8.1.1.** Сформулируйте постулаты специальной теории относительности (первый и второй постулаты Эйнштейна).

**8.1.2.** Между скоростями взаимодействия тел по классической и релятивистской физике существует принципиальное различие. В чем оно состоит?

**8.1.3.** Покажите, что релятивистский закон сложения скоростей согласуется со вторым постулатом специальной теории относительности.

**8.1.4.** С какой целью были поставлены опыты Резерфорда? Начертите схему установки, используемой Резерфордом для своих опытов, и поясните назначение всех ее элементов.

**8.1.5.** Почему в опытах Резерфорда лишь очень малая часть  $\alpha$ -частиц отклонялась на углы превышающие  $90^\circ$ ? Начертите вид траекторий движения  $\alpha$ -частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

**8.1.6.** Изобразите планетарную модель атома Резерфорда. В чем заключается противоречие планетарной модели атома с законами классической физики? [Система устойчива и имеет линейчатый спектр]

**8.1.7.** Сколько протонов, нейтронов и электронов содержит атом криптона  ${}_{36}^{72}\text{Kr}$  ?

**8.1.8.** Какова частота фотона, излучаемого при переходе атома из возбужденного состояния с энергией  $E_2$  в основное с энергией  $E_1$ ?

**8.1.9.** Какова частота фотона, поглощаемого атомом при переходе из основного состояния с энергией  $E_1$  в возбужденное с энергией  $E_2$ ?

**8.1.10.** Какова длина волны фотона, излучаемого при переходе атома из возбужденного состояния с энергией  $E_2$  в основное с энергией  $E_1$ ?

**8.1.11.** Какова длина волны фотона, поглощаемого атомом при переходе из основного состояния с энергией  $E_1$  в возбужденное с энергией  $E_2$ ?

**8.1.12.** Атом поглощает фотон с длиной волны  $\lambda$  и переходит из основного состояния с энергией  $E_1$  в возбужденное состояние. Какова энергия атома в возбужденном состоянии?

**8.1.13.** Какие типы люминесценции существуют в природе в зависимости от способа возбуждения атомов, молекул и ионов люминесцирующих веществ?

**8.1.14.** Можно ли вызвать у люминофора люминесцентное излучение в синей области спектра при облучении его световыми волнами из красной области спектра? Ответ обоснуйте.

**8.1.15.** В чем состоит различие между спонтанным (самопроизвольным) и индуцированным (вынужденным) излучениями? С помощью каких устройств можно получить индуцированное излучение в оптической области спектра?

**8.1.16.** Какую населенность энергетических уровней атома называют инверсной? Какое состояние электрона в атоме называют метастабильным?

**8.1.17.** Каков принцип действия рубинового лазера? Каковы основные особенности лазерного излучения?

**8.1.18.** Что является причиной радиоактивного распада? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате: 1) альфа-распада, 2) бета-распада?

**8.1.19.** Какие реакции называют цепными реакциями деления тяжелых ядер? Какая величина характеризует скорость протекания цепной ядерной реакции? Дайте определение этой величины. Какое условие является необходимым для стационарного протекания цепной ядерной реакции?

**8.1.20.** Какие реакции называют реакциями термоядерного синтеза? Почему термоядерные реакции могут протекать только при очень высоких (порядка миллионов градусов) температурах? Какие из реакций – реакции деления тяжелых ядер или реакции синтеза легких ядер являются энергетически более выгодными и почему?

**8.1.21.** Какой из двух процессов (1 или 2) приводит к увеличению числа нейтронов при цепной ядерной реакции: 1) захват медленных нейтронов ядрами  ${}_{92}^{235}\text{U}$  с последующим делением и захват быстрых нейтронов ядрами  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{92}^{238}\text{U}$  также с последующим делением; 2) захват нейтронов продуктами деления, замедлителем и конструктивными элементами ядерного реактора? Ответ обоснуйте.

**8.1.22.** Ядро изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , захватив один нейтрон, разделилось на два осколка. При этом освободилось два нейтрона. Один из осколков оказался ядром изотопа  ${}_{54}^{140}\text{Xe}$ . Каким был второй осколок? Представьте символическую запись этой ядерной реакции. [  ${}_{38}^{94}\text{Sr}$  ]

**8.1.23.** Для чего предназначен газоразрядный счетчик Гейгера? На каком физическом явлении основано его действие? Начертите схему этого счетчика и поясните назначение каждого его элемента.

**8.1.24.** Для чего предназначена камера Вильсона? Каков принцип ее работы? Начертите схему этой камеры и поясните назначение каждого ее элемента. В чем преимущество камеры Вильсона перед счетчиком Гейгера?

**8.1.25.** Для чего предназначена пузырьковая камера? Каков принцип ее работы? В чем преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона?

## 8.2.

**8.2.1.** В некоторой системе отсчета движутся вдоль оси  $x$  с одинаковыми скоростями  $v$  две светящиеся кометы: одна в сторону возрастания координаты  $x$ , другая – в сторону ее убывания. Какова скорость света, испускаемого второй кометой, измеренная в системе отсчета, связанной с первой кометой? [ $c$ ]

**8.2.2.** Система отсчета  $K$  (рис. 8.4), в которой находится наблюдатель, движется со скоростью  $v$  по прямой, соединяющей неподвижные источники света  $S_1$  и  $S_2$ . Каково отношение скоростей фотонов, пролетающих мимо наблюдателя от этих источников света? Ответ обоснуйте. [1]

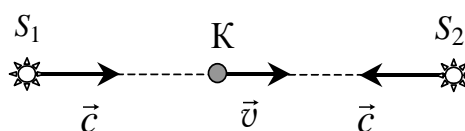


Рис. 8.4

**8.2.3.** Постройте график зависимости релятивистской массы электрона от его скорости. Можно ли разогнать электрон до скорости, равной скорости света в вакууме? Ответ обоснуйте.

**8.2.4.** Космический корабль (рис. 8.5), имеющий треугольную форму, пролетает мимо наблюдателя со скоростью  $v = 0,95c$ , ( $c$  – скорость света в вакууме). В состоянии покоя корабль имеет линейные размеры  $a_0$  и  $b_0$ . Какие размеры  $a$  и  $b$  будут казаться наблюдателю, по сравнению с размерами  $a_0$  и  $b_0$ , при движении корабля в направлении оси  $x$ ? Ответ обоснуйте. [ $a = a_0$ ;  $b < b_0$ ]

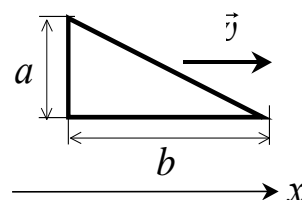


Рис. 8.5

**8.2.5.** Сколько квантов с различной энергией могут испускать атомы, находящиеся в состоянии с энергией  $E_4$ , (рис. 8.6)? Ответ обоснуйте. [6]

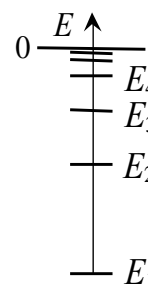


Рис. 8.6



**8.2.6.** В каком случае (1 или 2) электрон в атоме водорода находится ближе к ядру: 1) когда значение его энергии равно  $-3,38$  эВ; 2) когда значение его энергии равно  $-13,53$  эВ? Ответ обоснуйте. [2]

**8.2.7.** На рис. 8.7 представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой из указанных переходов (1, 2, 3, 4, 5, 6) соответствует излучению света с наибольшей длиной волны? Ответ обоснуйте. [4]

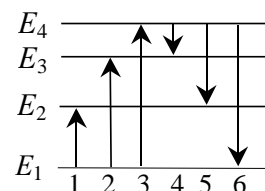


Рис. 8.7

**8.2.8.** На рис. 8.8 представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой из указанных переходов (1, 2, 3, 4, 5, 6) соответствует излучению света с наименьшей длиной волны? Ответ обоснуйте. [4]

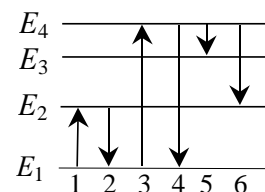


Рис. 8.8

**8.2.9.** На рис. 8.9 представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой из указанных переходов (1, 2, 3, 4, 5, 6) соответствует поглощению света с наибольшей длиной волны? Ответ обоснуйте. [1]

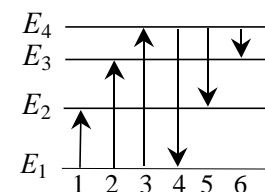


Рис. 8.9

**8.2.10.** На рис. 8.10 представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой из указанных переходов (1, 2, 3, 4, 5, 6) соответствует поглощению света с наименьшей длиной волны? Ответ обоснуйте. [3]

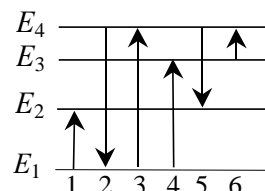


Рис. 8.10

**8.2.11.** На рис. 8.11 приведен спектр поглощения неизвестного газа и спектры поглощения паров известных металлов. Пары какого металла содержатся в неизвестном газе? Ответ обоснуйте. [Пары Sr, Ca, Na]

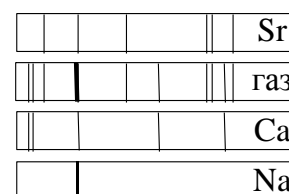


Рис. 8.11

**8.2.12.** На рис. 8.12 приведены спектры излучения трех газов: водорода (спектр *a*) и двух смесей газов (спектры *б* и *в*). В какой из смесей газов содержится водород? Ответ обоснуйте. [В смесях *б* и *в*]

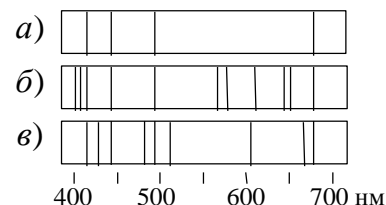


Рис. 8.12

**8.2.13.** На рис. 8.13 изображены спектры излучения смеси газов (спектр *в*) и двух газов (спектры *а* и *б*). Определите, есть ли в смеси газов газы *а* и *б*. Ответ обоснуйте. [Есть]

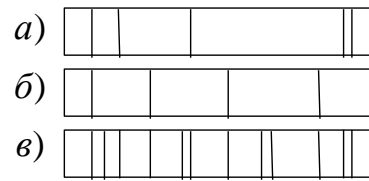


Рис. 8.13

**8.2.14.** Пусть начальное число  $N_0$  атомов двух радиоактивных изотопов одинаково, а отношение их периодов полураспада  $T_{1(1/2)}/T_{2(1/2)} = 2$ . Постройте (в одних координатах) графики зависимости числа нераспавшихся атомов этих изотопов от времени.

**8.2.15.** На рис. 8.14 представлен график зависимости числа нераспавшихся ядер изотопа франция  ${}^{207}_{87}\text{Fr}$  от времени. Каков период полураспада (в секундах) этого изотопа? Ответ обоснуйте. [15]

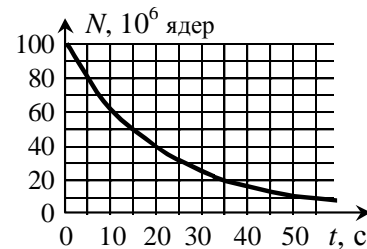


Рис. 8.14

**8.2.16.** Энергетический спектр электронов при  $\beta^-$ -распаде в отличие от линейчатого энергетического спектра  $\alpha$ -частиц при  $\alpha$ -распаде является сплошным. Нарисуйте график распределения электронов при  $\beta^-$ -распаде по энергиям и поясните, чем обусловлено различие в энергетических спектрах  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов.

**8.2.17.** На рис. 8.15 изображена крупца урана в контейнере с отверстием. Контейнер помещен в однородное магнитное поле. Вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости рисунка к нам. Определите, какое из направлений траекторий 1, 2 или 3 соответствует потоку  $\alpha$ -частиц? Ответ обоснуйте. [3]

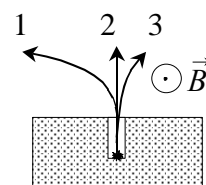


Рис. 8.15

**8.2.18.** На рис. 8.16 изображена крупца урана в контейнере с отверстием. Контейнер помещен в однородное электрическое поле. Напряженность  $\vec{E}$  электрического поля направлена в плоскости рисунка слева направо. Определите, какое из направлений траекторий 1, 2 или 3 соответствует потоку  $\beta^-$ -частиц? Ответ обоснуйте. [1]

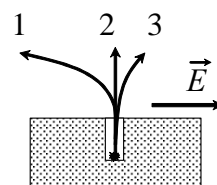


Рис. 8.16

**8.2.19.** На рис. 8.15 изображена крупца урана в контейнере с отверстием. Контейнер помещен в однородное магнитное поле. Вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости рисунка к нам. Определите, какое из направлений траекторий 1, 2 или 3 соответствует потоку  $\gamma$ -частиц? Ответ обоснуйте. [2]

**8.2.20.** На рис. 8.17 показан трек  $\alpha$ -частицы в камере Вильсона, помещенной в однородное магнитное поле. Полагая, что вектор магнитной индукции направлен от нас, определите направление движения частицы. Ответ обоснуйте. [Снизу вверх]

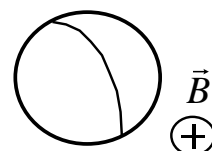


Рис. 8.17

**8.2.21.** На рис. 8.18 показан трек  $\beta^-$ -частицы в камере Вильсона, помещенной в однородное магнитное поле. Полагая, что вектор магнитной индукции направлен к нам, определите направление движения частицы. Ответ обоснуйте. [Снизу вверх]

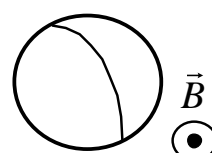


Рис. 8.18

**8.2.22.** На рис. 8.19 показан трек протона в камере Вильсона, помещенной в однородное магнитное поле. Полагая, что протон движется снизу вверх, определите направление вектора индукции магнитного поля. Ответ обоснуйте. [К нам]

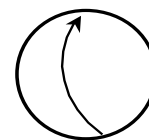


Рис. 8.19

**8.2.23.** На рис. 8.20 показан трек заряженной частицы в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Частица прошла через тонкий слой свинца АВ. Как двигалась частица: сверху вниз или снизу вверх? Ответ обоснуйте. [Снизу вверх]

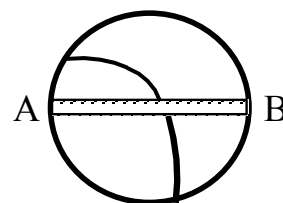


Рис. 8.20

**8.2.24.** Постройте график зависимости удельной энергии связи  $E_{св}/A$  нуклонов в ядре от массового числа  $A$ . Объясните, почему при больших массовых числах удельная энергия связи уменьшается.

**8.2.25.** Используя закон радиоактивного распада, получите формулу, по которой можно определить число распавшихся ядер. Постройте график зависимости числа распавшихся ядер от времени.

### 8.3.

**8.3.1.** Какими стали бы размеры тела в направлении его движения относительно неподвижного наблюдателя, если бы скорость тела равнялась скорости света в вакууме? Возможно ли развить такую скорость? Ответ обоснуйте. [0; нет, невозможно]

**8.3.2.** Энергия покоя нейтрального мезона равна 135 МэВ. Какова его масса покоя? Полученный ответ представьте в единицах СИ и умножьте на  $10^{29}$ . [24]

**8.3.3.** Сколько электронов содержится в электронной оболочке нейтрального атома, ядро которого состоит из 16 протонов и 16 нейтронов? Ответ обоснуйте. [16]

**8.3.4.** Наиболее интенсивная спектральная линия в спектре излучения атома водорода (красная линия в серии Бальмера) соответствует длине волны 656 нм. Какова частота этого излучения? Ответ представьте в терагерцах и округлите до целого числа. [457]

**8.3.5.** Частота, соответствующая голубой спектральной линии в спектре излучения атома водорода (в серии Бальмера), равна  $6,91 \cdot 10^{14}$  Гц. Какова длина волны, соответствующая этой спектральной линии? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [434]

**8.3.6.** Какую минимальную энергию необходимо сообщить атому водорода, находящемуся в основном состоянии, чтобы он, поглотив ее, ионизировался? Ответ представьте в электронвольтах. [13,6]

**8.3.7.** Для ионизации атома кислорода необходима энергия 14 эВ. Найдите минимальную частоту кванта излучения, который может вызвать ионизацию атома кислорода. Ответ представьте в единицах СИ, округлите до второй значащей цифры и умножьте на  $10^{-15}$ . [3,4]

**8.3.8.** При переходе из одного стационарного состояния в другое атом водорода излучает квант света с частотой  $6,17 \cdot 10^{14}$  Гц. Определите длину волны, соответствующую этому кванту. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [486]

**8.3.9.** При переходе атома водорода из основного состояния с энергией  $-13,6$  эВ в стационарное состояние с энергией  $-3,4$  эВ происходит поглощение кванта света. Определите энергию этого кванта. Ответ представьте в электронвольтах. [10,2]

**8.3.10.** Атом водорода может находиться в основном состоянии с энергией  $E_1 = -13,6$  эВ и в возбужденных состояниях с энергиями  $E_2 = -3,4$  эВ и  $E_3 = -1,51$  эВ. Во сколько раз энергия фотона, испущенного при переходе атома из первого возбужденного состояния в основное, больше энергии фотона, испущенного при переходе атома из второго возбужденного состояния в первое возбужденное состояние? Ответ округлите до десятых. [5,4]

**8.3.11.** Изменяется ли массовое число радиоактивного элемента при испускании ядром  $\gamma$ -кванта? Ответ обоснуйте. [Нет]

**8.3.12.** В результате какого радиоактивного распада плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  превращается в уран  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ? [В результате  $\alpha$ -распада]

**8.3.13.** В результате какого радиоактивного распада изотоп натрия  ${}_{11}^{22}\text{Na}$  превращается в изотоп магния  ${}_{12}^{22}\text{Mg}$ ? [В результате  $\beta^-$ -распада]

**8.3.14.** Какой изотоп образуется из урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после  $\alpha$ -распада и двух  $\beta^-$ -распадов? [ ${}_{92}^{234}\text{U}$ ]

**8.3.15.** Ядро полония  ${}_{84}^{216}\text{Po}$  образовалось после двух последовательных  $\alpha$ -распадов. Из какого ядра получилось ядро полония? [ ${}_{88}^{224}\text{Ra}$ ]

**8.3.16.** Ядро изотопа  ${}_{83}^{211}\text{Bi}$  получилось из другого ядра после одного  $\alpha$ - и одного  $\beta^-$ -распадов. Что это за ядро? [ ${}_{84}^{215}\text{Po}$ ]

**8.3.17.** Какой изотоп образуется из тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  после четырех  $\alpha$ -распадов и двух  $\beta^-$ -распадов? [ ${}_{84}^{216}\text{Po}$ ]

**8.3.18.** Какова энергия связи ядра гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ ? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах. [27,4]

**8.3.19.** Какова удельная энергия связи ядра  ${}_{6}^{12}\text{C}$ ? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах на нуклон и округлите до десятых. [7,7]

**8.3.20.** Радиоактивный изотоп технеция  ${}_{43}^{95}\text{Tc}$ , не обнаруженный в природе, был получен искусственно в результате реакции:  ${}_{42}^{94}\text{Mo} + {}_{1}^2\text{H} \rightarrow \rightarrow {}_{43}^{95}\text{Tc} + ?$  Допишите эту реакцию.

**8.3.21.** В земной атмосфере все время происходит ядерная реакция, при которой космические нейтроны непрерывно бомбардируют атомы атмосферного азота с образованием радиоактивного углерода  $^{14}_6\text{C}$ . Напишите эту реакцию.

**8.3.22.** При бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами были открыты нейтроны. Допишите эту реакцию:  $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^1_0\text{n} + \dots$

**8.3.23.** Определите второй продукт ядерной реакции:  $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ? [^1_0\text{n}]$

**8.3.24.** В результате захвата  $\alpha$ -частицы ядром изотопа азота  $^{14}_7\text{N}$  образуются неизвестное ядро и протон. Напишите ядерную реакцию для этого случая и определите неизвестное ядро. [ $^{17}_8\text{O}$ ]

**8.3.25.** В результате захвата протона ядром изотопа бора  $^{11}_5\text{B}$  образуются ядро бериллия  $^8_4\text{Be}$  и неизвестная частица. Напишите ядерную реакцию для этого случая и определите неизвестную частицу. [ $^4_2\text{He}$ ]

## 8.4.

**8.4.1.** С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его релятивистская масса была в четыре раза больше массы покоя? Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до десятых. [2,9]

**8.4.2.** С какой скоростью относительно земного наблюдателя должно двигаться тело, чтобы его размер вдоль линии движения сократился в два раза? Изменится ли этот размер для наблюдателя, движущегося вместе с телом? Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до десятых. [2,6; нет, не изменится]

**8.4.3.** В ракете, движущейся со скоростью  $0,96c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, было зафиксировано время полета 1 год. Сколько времени продолжался полет по подсчетам земного наблюдателя? Ответ представьте в годах и округлите до сотых. [3,57]

**8.4.4.** При переходе из одного энергетического состояния в другое атом излучает квант света с энергией 1,89 эВ. Определите длину волны, соответствующую этому кванту. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [658]

**8.4.5.** Определите длину волны, соответствующей наиболее коротковолновой спектральной линии в спектре излучения атома водорода (в серии Лаймана). Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [91]

**8.4.6.** Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов, равную 10,2 В, отдает атому водорода всю свою кинетическую энергию. При переходе атома водорода в основное состояние он излучает квант света. Определите частоту излучения. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-15}$  и округлите до сотых. [2,46]

**8.4.7.** При переходе электрона в атоме водорода с четвертой стационарной орбиты на вторую излучается зеленая линия водородного спектра. Определите длину волны этой линии, если при излучении атом теряет энергию 2,53 эВ. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [491]

**8.4.8.** При переходе из одного стационарного состояния в другое атом водорода излучает фотон с частотой  $4,5 \cdot 10^{14}$  Гц. Определите импульс этого фотона. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{27}$  и округлите до целого числа. [1].

**8.4.9.** При облучении паров ртути электронами энергия атома ртути увеличилась на 4,9 эВ. Свет какой длины волны будет излучать атом при переходе в основное состояние? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [254]

**8.4.10.** Для ионизации атома бериллия необходима энергия  $1,49 \cdot 10^{-18}$  Дж. Определите длину волны света, который может вызвать ионизацию атома бериллия. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [133]

**8.4.11.** При облучении люминофора ультрафиолетовым светом с длиной волны 300 нм возникает видимое свечение со средней длиной волны 480 нм. Сколько процентов энергии света, падающего на люминофор, превращается в энергию видимого излучения? [62,5]

**8.4.12.** Электроны, прошедшие ускоряющую разность потенциалов 120 В, бомбардируют люминофор, в результате чего возникает его све-

чение, называемое катодолюминесценцией. Определите длину волны люминесцентного излучения, если в излучение перешло 2 % кинетической энергии электрона. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [518]

**8.4.13.** Какая доля ядер радиоактивного вещества останется спустя время  $1/\lambda$  ( $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада). Ответ округлите до сотых. [0,37]

**8.4.14.** Постоянные радиоактивного распада ядер изотопов висмута  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$  и полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  соответственно равны  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  и  $5,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ . Период полураспада ядер какого изотопа больше и во сколько раз? Ответ округлите до целого числа. [Второго; 28]

**8.4.15.** Определите массовое число ядра атома цезия, если известно, что порядковый номер цезия в периодической системе Менделеева равен 55 и его ядро содержит 78 нейтронов. [133]

**8.4.16.** Определите число протонов в ядре атома циркония, если известно, что в этом ядре содержится 51 нейтрон, а его массовое число равно 91. [40]

**8.4.17.** На сколько число нейтронов в ядре изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  больше числа протонов? [51]

**8.4.18.** На сколько число нейтронов в ядре изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  больше, чем число протонов в ядре  ${}_{2}^{4}\text{He}$ ? [141]

**8.4.19.** На сколько число нейтронов в ядре изотопа урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  больше числа протонов в ядре изотопа кислорода  ${}_{8}^{16}\text{O}$ ? [138]

**8.4.20.** На сколько число нейтронов в ядре изотопа самария  ${}_{62}^{152}\text{Sm}$  больше числа протонов в ядре изотопа неодима  ${}_{60}^{144}\text{Nd}$ ? [30]

**8.4.21.** На сколько число нейтронов в ядре изотопа кадмия  ${}_{48}^{114}\text{Cd}$  больше числа нейтронов в ядре изотопа циркония  ${}_{40}^{90}\text{Zr}$ ? [16]

**8.4.22.** Во сколько раз число нейтронов в ядре изотопа кобальта  ${}_{27}^{59}\text{Co}$  больше числа нейтронов в ядре изотопа азота  ${}_{7}^{15}\text{N}$ ? [4]



**8.4.23.** Во сколько раз число нуклонов в ядре изотопа церия  ${}_{58}^{140}\text{Ce}$  больше числа протонов в ядре изотопа кальция  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ ? [7]

**8.4.24.** Во сколько раз число нуклонов в ядре изотопа неона  ${}_{10}^{20}\text{Ne}$  меньше числа нуклонов в ядре изотопа ксенона  ${}_{54}^{130}\text{Xe}$ ? [6,5]

**8.4.25.** Частота волны  $\gamma$ -излучения, возникающего при термоядерной реакции:  ${}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$ , равна  $3 \cdot 10^{19}$  Гц. Найдите энергию  $\gamma$ -кванта. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{14}$  и округлите до целого числа. [2]

## 8.5.

**8.5.1.** С какой максимальной скоростью должен двигаться в ускорителе протон, чтобы увеличение его массы не превышало 10 %? Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до сотых. [1,25]

**8.5.2.** Определите импульс электрона, если он движется со скоростью, равной 0,6 скорости света в вакууме. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{22}$  и округлите до сотых. [2,05]

**8.5.3.** Ракета движется со скоростью  $1,8 \cdot 10^8$  м/с. Во сколько раз замедлится ход времени с точки зрения земного наблюдателя? [1,25]

**8.5.4.** Ракета движется со скоростью  $0,866c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, относительно земного наблюдателя. В ней вдоль линии движения расположен плоский прямоугольник, поперечная сторона которого, в два раза меньше продольной. Каким должен воспринимать этот прямоугольник земной наблюдатель? [В виде квадрата]

**8.5.5.** На сколько изменится масса 1 кг льда при плавлении? Ответ представьте в пикокилограммах и округлите до десятых. [3,7]

**8.5.6.** Атом, получив в результате неупругого соударения с электроном энергию 4,5 эВ, излучает квант света. Определите длину волны излучения атома. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [276]

**8.5.7.** На рис. 8.21 изображены энергетические уровни атома и указаны длины волн для фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах с одного уровня на другой. Какова минимальная частота, соответствующая фотонам, излучаемых при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , если  $\lambda_{13} = 300$  нм,  $\lambda_{24} = 400$  нм,  $\lambda_{32} = 500$  нм? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$ . [150]

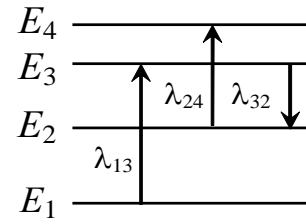


Рис. 8.21

**8.5.8.** На рис. 8.21 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны длины волн для фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах с одного уровня на другой. Какова максимальная частота, соответствующая фотонам, излучаемым при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , если  $\lambda_{13} = 200$  нм,  $\lambda_{24} = 400$  нм,  $\lambda_{32} = 600$  нм? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$ . [1750]

**8.5.9.** На рис. 8.21 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны длины волн для фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах с одного уровня на другой. Минимальная длина световой волны для фотонов, излучаемых при переходах между этими уровнями, равна 200 нм. Какова величина  $\lambda_{23}$ , если  $\lambda_{13} = 250$  нм,  $\lambda_{24} = 400$  нм? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [667]

**8.5.10.** На рис. 8.22 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны частоты фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах между этими уровнями. Какова минимальная длина волны фотонов, излучаемых атомом при любых возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , если  $\nu_{13} = 6,5 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{24} = 4 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{32} = 2,5 \cdot 10^{14}$  Гц? Ответ представьте в нанометрах. [375]

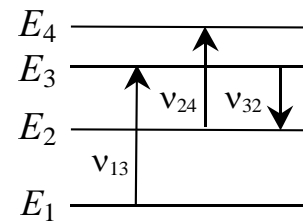


Рис. 8.22

**8.5.11.** На рис. 8.22 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны частоты фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах между этими уровнями. Какова максимальная длина волны фотонов, излучаемых атомом при любых возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , если  $\nu_{13} = 6,2 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{24} = 5,5 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{32} = 3,5 \cdot 10^{14}$  Гц? Ответ представьте в нанометрах. [1500]

**8.5.12.** На рис. 8.22 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны частоты фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах между этими уровнями. Какова частота  $\nu_{24}$ , если  $\nu_{13} = 6 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{32} = 2 \cdot 10^{14}$  Гц, а при переходе с уровня  $E_4$  на уровень  $E_1$  излучаются фотоны с длиной волны 320 нм? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$  и округлите до целого числа. [538]

**8.5.13.** На рис. 8.22 изображены несколько энергетических уровней атома и указаны частоты фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах между этими уровнями. Какова частота  $\nu_{13}$ , если  $\nu_{24} = 4,2 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\nu_{32} = 2,5 \cdot 10^{14}$  Гц, а при переходе с уровня  $E_4$  на уровень  $E_1$  излучаются фотоны с длиной волны 350 нм? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$  и округлите до целого числа. [687]

**8.5.14.** Ядро нептуния  ${}_{93}^{237}\text{Np}$ , испытав серию  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов, превратилось в ядро висмута  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ . Определите общее число  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов. [11]

**8.5.15.** Постоянная радиоактивного распада изотопа магния  ${}_{12}^{27}\text{Mg}$  равна  $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Определите период полураспада этого изотопа. Ответ представьте в минутах и округлите до целого числа. [10]

**8.5.16.** Какая доля радиоактивных ядер некоторого элемента распадается за время, равное трем периодам полураспада? [0,875]

**8.5.17.** Из 20 одинаковых радиоактивных ядер за 1 мин испытало радиоактивный распад 10 ядер. Сколько ядер испытают распад за следующую минуту? Ответ обоснуйте. [От 0 до 10 ядер]

**8.5.18.** Определите плотность ядерного вещества, если средний объем, занимаемый одним нуклоном, равен  $2 \cdot 10^{-38} \text{ см}^3$ . Масса нуклона  $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Ответ представьте в килотоннах на кубический миллиметр и округлите до десятых. [83,5]

**8.5.19.** Дефект массы при образовании ядра атома гелия из трития и дейтерия равен  $3,15 \cdot 10^{-29} \text{ кг}$ . Определите энергию, соответствующую данному процессу. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. [17,7]

**8.5.20.** Масса нейтрона больше массы протона на 0,001 а.е.м.. Какой энергии соответствует разность масс этих частиц? Ответ представьте в пикоджоулях и округлите до сотых. [0,15]

**8.5.21.** Определите энергию связи ядра бериллия  ${}^9_4\text{Be}$ , если известно, что дефект массы этого ядра  $1,03 \cdot 10^{-28}$  кг. Ответ представьте в пикоджоулях и округлите до десятых. [9,3]

**8.5.22.** В процессе деления ядро урана распадается на две части, общая масса которых меньше массы ядра урана на  $0,2m_p$ , где  $m_p$  – масса покоя протона. Определите энергию, выделившуюся при делении ядра урана. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до целого числа. [188]

**8.5.23.** Удельная энергия связи в ядре  ${}^4_2\text{He}$  равна 7 МэВ. Найдите минимальную энергию  $\gamma$ -кванта, способного разделить ядро на свободные нуклоны. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах. [28]

**8.5.24.** Найдите энергию фотона при аннигиляции электрона и позитрона по реакции  $e^- + e^+ \rightarrow h\nu + h\nu$ . Кинетической энергией частиц до реакции пренебrecь. Масса покоя позитрона равна массе покоя электрона. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до сотых. [0,51]

**8.5.25.** Какая минимальная энергия необходима для расщепления ядра изотопа лития на составляющие его нуклоны, если массовое и зарядовое числа ядра лития соответственно равны 7 и 3, масса ядра 7,011 а.е.м.? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до целого числа. [39]

## 8.6.

**8.6.1.** Импульс релятивистской частицы равен  $m_0c$ , где  $m_0$  – ее масса покоя,  $c$  – скорость света в вакууме. Определите скорость частицы. Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до десятых. [2,1]

**8.6.2.** Два электрона движутся в противоположных направлениях со скоростями  $0,9c$  и  $0,8c$  относительно Земли ( $c$  – скорость света в вакууме). Какова скорость второго электрона в системе отсчета, связанной с первым электроном? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до сотых. [2,97]

**8.6.3.** Две частицы движущиеся относительно Земли со скоростью, равной  $0,8c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, попали в неподвижную

относительно Земли мишень с промежутком времени (в системе отсчета, связанной с Землей)  $5 \cdot 10^{-9}$  с. Каким было собственное расстояние между частицами до попадания в мишень? Ответ представьте в единицах СИ. [2]

**8.6.4.** Вычислите радиус первой борховской орбиты атома водорода. Скорость электрона на первой борховской орбите 2,2 Мм/с. Ответ представьте в ангстремах и округлите до десятых. [0,5]

**8.6.5.** Наиболее интенсивная линия с длиной волны 656 нм, наблюдаемая в спектре атома водорода, обусловлена переходом в состояние, энергия которого равна  $-3,4$  эВ. Какова энергия состояния, из которого произошел данный переход? Ответ представьте в электронвольтах и округлите до десятых. [-1,5]

**8.6.6.** Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизовать атом водорода? Ответ представьте в мегаметрах в секунду и округлите до десятых. [2,2]

**8.6.7.** Фотон с энергией 15,5 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома? Ответ представьте в мегаметрах в секунду и округлите до десятых. [0,8]

**8.6.8.** Для ионизации атома лития необходима энергия  $8,63 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите длину волны света, который может вызвать ионизацию этого атома. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [230]

**8.6.9.** При переходе из одного энергетического состояния в другое энергия атома натрия уменьшилась на  $3,37 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите длину волны излучения, соответствующую этому переходу. Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [590]

**8.6.10.** На рис. 8.23 изображены несколько энергетических уровней атома. Минимальная длина волны света, излучаемого при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , равна 250 нм. Известно, что частоты переходов относятся друг к другу как  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ . Какова длина световой волны с частотой  $\nu_{32}$ ? Ответ представьте в нанометрах. [750]

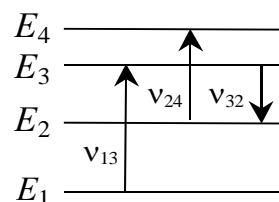


Рис. 8.23

**8.6.11.** На рис. 8.23 изображены несколько энергетических уровней атома. Минимальная длина волны света, излучаемого при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , равна 250 нм. Известно, что частоты переходов относятся друг к другу как  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ . Какова минимальная частота света в переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ ? Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$ . [300]

**8.6.12.** На рис. 8.23 изображены несколько энергетических уровней атома. Максимальная длина волны света, излучаемого при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , равна 800 нм. Известно, что частоты переходов относятся друг к другу как  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ . Какова длина волны света с частотой  $\nu_{32}$ ? Ответ представьте в нанометрах. [600]

**8.6.13.** На рис. 8.23 изображены несколько энергетических уровней атома. Максимальная длина волны света, излучаемого при всех возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , равна 800 нм. Известно, что частоты переходов относятся друг к другу как  $\nu_{13} : \nu_{24} : \nu_{32} = 9 : 7 : 4$ . Какова длина волны света с частотой  $\nu_{13}$ ? Ответ представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [267]

**8.6.14.** На рис. 8.23 изображены несколько энергетических уровней атома. Максимальная длина световой волны, испускаемой или поглощаемой атомом при всех возможных переходах между этими уровнями, равна 1200 нм, а минимальная длина волны – 250 нм. Найдите частоту  $\nu_{13}$  фотона, поглощаемого при переходе с уровня  $E_1$  на уровень  $E_3$ , если  $\nu_{32} = 6 \cdot 10^{14}$  Гц и известно, что  $\nu_{13} < \nu_{24}$ . Полученный ответ (в единицах СИ) умножьте на  $10^{-12}$ . [850]

**8.6.15.** Сколько происходит  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов ядра изотопа урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  при его радиоактивном превращении в ядро изотопа свинца  ${}_{82}^{198}\text{Pb}$ ? [10 и 10]

**8.6.16.** Найдите долю атомов радиоактивного изотопа, распавшихся за время  $4T_{1/2}$ , где  $T_{1/2}$  – период полураспада. Ответ округлите до сотых. [0,94]

**8.6.17.** Активность некоторого радиоактивного изотопа в начальный момент времени была равна 55 Бк. Какова активность этого изотопа по истечении времени, равного половине его периода полураспада? Ответ представьте в единицах СИ и округлите до целого числа. [39]

**8.6.18.** Ядро азота  ${}^{14}_7\text{N}$  захватило  $\alpha$ -частицу и испустило протон. Определите массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  образовавшегося ядра. [17; 8]

**8.6.19.** Определите дефект массы ядра бора  ${}^{10}_5\text{B}$ , если масса этого ядра  $1,6627 \cdot 10^{-26}$  кг. Ответ представьте в атомных единицах массы и округлите до тысячных. [0,068]

**8.6.20.** Определите энергию связи ядра бериллия  ${}^9_4\text{Be}$ . Масса ядра бериллия  $1,4962 \cdot 10^{-26}$  кг. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до целого числа. [59]

**8.6.21.** Определите энергию связи ядра полония  ${}^{210}_{84}\text{Po}$ , если известно, что удельная энергия связи этого ядра равна 7,88 МэВ/нуклон. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах. [1654,8]

**8.6.22.** Дефект массы при образовании ядра атома гелия и нейтрона из трития и дейтерия ( ${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ ) равен  $3,13 \cdot 10^{-29}$  кг. Определите энергию, выделяющуюся при этой термоядерной реакции. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. [17,6]

**8.6.23.** В результате взаимодействия ядра дейтерия с ядром трития образуется ядро атома гелия и нейтрон. Какая энергия выделяется при этой термоядерной реакции? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до целого числа. [19]

**8.6.24.** Когда ядро бора  ${}^{11}_5\text{B}$  захватывает быстро движущийся протон, то в камере Вильсона (рис. 8.24), где протекает эта ядерная реакция, образуются три почти одинаковых трека, расходящиеся веером в разные стороны. Какие частицы образовали эти треки? [ $\alpha$ -Частицы]

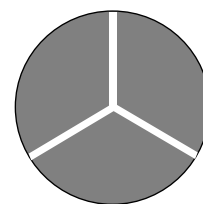


Рис. 8.24

**8.6.25.** При делении одного ядра урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  выделяется энергия 200 МэВ. Определите, какую долю энергии покоя ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$  составляет выделившаяся энергия. Массы покоя нейтрона и протона считать равными  $1,674 \cdot 10^{-27}$  кг. Ответ представьте в процентах и округлите до десятых. [0,1]

## 8.7.

**8.7.1.** Какую скорость должно иметь тело в виде куба со сторонами  $a$  при движении вдоль оси  $x$ , как показано на рис.8.25, чтобы плотность тела увеличилась в два раза? Ответ представьте в мегаметрах за секунду и округлите до целого числа. [212]

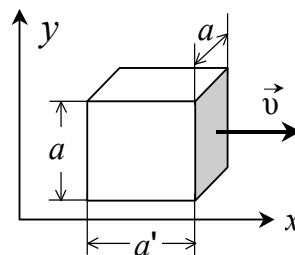


Рис. 8.25

**8.7.2.** Найдите скорость частицы, если ее кинетическая энергия составляет половину энергии покоя. Ответ представьте в гигаметрах за секунду и округлите до сотых. [0,22]

**8.7.3.** Собственное время жизни элементарной частицы  $\mu$ -мезона равно 2 мкс. От точки рождения до точки распада  $\mu$ -мезон пролетел относительно земного наблюдателя расстояние 6 км. С какой скоростью относительно Земли двигался  $\mu$ -мезон? Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-8}$  и округлите до тысячных. [2,985]

**8.7.4.** Какова должна быть скорость частицы, движущейся со скоростью, близкой к скорости света, чтобы ее кинетическая энергия была равна энергии покоя? Ответ представьте в гигаметрах в секунду и округлите до сотых. [0,26]

**8.7.5.** Электрон, ускоренный электрическим полем, приобрел скорость, при которой его масса стала равна удвоенной массе покоя. Какова разность потенциалов, пройденная электроном? Ответ представьте в мегавольтах и округлите до десятых. [0,5]

**8.7.6.** На сколько увеличится масса пружины жесткостью 10 кН/м при ее растяжении на 3 см? Ответ представьте в единицах СИ и умножьте на  $10^{18}$ . [50]

**8.7.7.** Чайник, в котором содержится 3 л воды, нагрели от  $10^\circ\text{C}$  до кипения. На сколько увеличится масса воды? Ответ представьте в единицах СИ и умножьте на  $10^{12}$ . [12,6]

**8.7.8.** Мощность излучения Солнца  $3,9 \cdot 10^{26}$  Вт. Считая его излучение постоянным, найдите, за какое время масса Солнца уменьшится вдвое? Ответ представьте в годах, умножьте на  $10^{-12}$  и округлите до целого числа. [7]



**8.7.9.** Электрон в атоме водорода может находиться на круговых орбитах радиусами  $0,5 \cdot 10^{-8}$  м и  $2 \cdot 10^{-8}$  м. Во сколько раз различаются угловые скорости электрона на этих орбитах? [8]

**8.7.10.** Во сколько раз длина волны, соответствующая второй спектральной линии в серии Бальмера, больше длины волны, соответствующей третьей спектральной линии в этой серии? Ответ округлите до сотых. [1,12]

**8.7.11.** Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны 121,5 нм. Определите радиус  $r_n$  электронной орбиты возбужденного атома водорода. Ответ представьте в пикометрах и округлите до целого числа. [212]

**8.7.12.** Может ли ядро углерода испытать  $\alpha$ -распад по схеме:  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$ ? Ответ обоснуйте. [Не может]

**8.7.13.** Может ли ядро изотопа азота  ${}^{13}_7\text{N}$  испытать  $\beta^+$ -распад по схеме:  ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_{+1}\text{e}$ ? Ответ обоснуйте. [Может]

**8.7.14.** Определите период полураспада радона, если за 24 ч распалось  $1,75 \cdot 10^5$  атомов из  $10^6$  атомов. Ответ представьте в часах и округлите до десятых. [86,5]

**8.7.15.** За какое время распадется 25 % начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада равен 24 ч? Ответ представьте в часах и округлите до десятых. [10,5]

**8.7.16.** Во сколько раз уменьшится число радиоактивных ядер изотопа актиния  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  за 30 суток, если период его полураспада равен 10 суток? Ответ округлите до целого числа. [8]

**8.7.17.** Найдите долю распавшихся атомов некоторого изотопа за время  $2/\lambda$ , где  $\lambda$  – постоянная распада изотопа. Принять основание натуральных логарифмов  $e = 2,72$ . Ответ округлите до сотых. [0,86]

**8.7.18.** Какая доля радиоактивных ядер изотопа углерода  ${}^{14}_6\text{C}$  распадется за 100 лет, если период его полураспада равен 5570 лет? Ответ представьте в процентах и округлите до десятых. [1,2]

**8.7.19.** За 8 ч начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в 3 раза. Во сколько раз оно уменьшится за сутки, считая от начального момента времени? [27]

**8.7.20.** За время, равное 24 ч, активность радиоактивного изотопа уменьшилась от 118 ГБк до 7,4 ГБк. Определите период полураспада этого изотопа. Ответ представьте в часах и округлите до целого числа. [6]

**8.7.21.** На сколько процентов уменьшится активность радиоактивного изотопа, период полураспада которого 75 сут, за время, равное 30 сут? Ответ округлите до целого числа. [24]

**8.7.22.** Определите минимальную энергию, необходимую для разделения ядра углерода  $^{12}_6\text{C}$  на три одинаковых частицы. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. [7,3]

**8.7.23.** В процессе термоядерного синтеза  $5 \cdot 10^4$  кг водорода превращаются в 49644 кг гелия. Каков энергетический выход этой реакции? Ответ представьте в единицах СИ, умножьте на  $10^{-19}$  и округлите до десятых. [3,2]

**8.7.24.** В реакции  $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$  масса исходных частиц превышает массу конечных продуктов реакции на 0,00612 а.е.м. Сколько при этом выделяется или поглощается энергии? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. Поставьте знак “минус”, если энергия поглощается. [5,7]

**8.7.25.** Каков энергетический выход ядерной реакции:  $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$ ? Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. Поставьте знак “минус”, если энергия поглощается. [-1,2]

**8.7.26.** Определите кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы и электронов, возникающих в ядерной реакции синтеза:  $4^1_1\text{p} \rightarrow ^4_2\text{He} + 2^0_{-1}\text{e} + 2\nu$ . Энергия каждого нейтрино  $\nu$  равна 0,3 МэВ. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до десятых. [23,2]

**8.7.27.** Определите энергию, которая выделяется при делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана  $^{235}_{92}\text{U}$ . Энергия, выделяемая при делении

одного ядра урана, равна  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в гигаджоулях и округлите до целого числа. [82]

**8.7.28.** Нейтрон с кинетической энергией  $1,5 \cdot 10^{-15}$  Дж поглощается первоначально неподвижным ядром кадмия  $^{112}_{48}\text{Cd}$ . Определите скорость вновь образовавшегося ядра. Массы протона и нейтрона считать одинаковыми и равными  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Ответ представьте в километрах за секунду и округлите до целого числа. [12]

**8.7.29.** Покоившееся ядро радона  $^{222}_{86}\text{Rn}$  выбросило  $\alpha$ -частицу (ядро  $^4_2\text{He}$ ) со скоростью 16 Мм/с. Какую скорость получило оно вследствие отдачи? Массы протона и нейтрона считать одинаковыми и равными  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Ответ представьте в километрах за секунду и округлите до целого числа. [294]

**8.7.30.** Нейтрон с массой  $m$ , двигаясь со скоростью  $v$ , ударяется о неподвижное ядро с массой  $3m$ . Считая удар центральным и упругим, найдите во сколько раз уменьшится кинетическая энергия нейтрона. [4]

## 8.8.

**8.8.1.** Собственное время жизни некоторой нестабильной частицы 10 нс. Найдите путь, пройденный этой частицей до распада в неподвижной системе отсчета, если её время жизни в ней 20 нс. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [5,2]

**8.8.2.** Ускоритель сообщил радиоактивному ядру скорость  $0,4c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. В момент вылета из ускорителя ядро выбросило в направлении своего движения  $\beta$  – частицу со скоростью  $0,75c$  относительно ускорителя. Определите скорость частицы относительно ядра. Ответ представьте в метрах за секунду. [150]

**8.8.3.** Какую работу надо совершить, чтобы увеличить скорость электрона от  $0,6c$  до  $0,8c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Полученный ответ представьте в джоулях, умножьте на  $10^{15}$  и округлите до целого числа. [34]

**8.8.4.** Какова скорость электрона после сообщения ему энергии 1 МэВ в ускорителе? Ответ представьте в гигаэлектронвольтах за секунду и округлите до сотых. [0,28]

**8.8.5.** Найдите отношение кинетической энергии частицы к ее энергии покоя, если скорость частицы 150 Мм/с. Частицу рассматривать как релятивистскую. Ответ округлите до сотых. [0,16]

**8.8.6.** Какой длины волны спектральные линии появятся при возбуждении атомарного водорода электронами с энергией 12,5 эВ? Ответы представьте в нанометрах и округлите до целого числа. [103; 122; 656]

**8.8.7.** На дифракционную решетку падает нормально пучок света от газоразрядной трубки, наполненной атомарным водородом. Постоянная решетки  $5 \cdot 10^{-4}$  см. С какой орбиты должен перейти электрон на вторую орбиту, чтобы спектральную линию в спектре 5-го порядка можно было наблюдать под углом  $41^\circ$ ? [3]

**8.8.8.** Максимальный уровень энергии при возбуждении атомов в рубиновом лазере происходит при поглощении световых волн длиной 560 нм. Лазер при этом генерирует световые волны длиной 694 нм. Определите разность энергетических уровней атома между состоянием возбуждения и состоянием излучения. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до тысячных. [0,429]

**8.8.9.** Атом позитрония состоит из электрона и позитрона, обращающихся вокруг их общего неподвижного центра масс. Позитрон имеет массу, равную массе электрона, и заряд, равный по модулю заряду электрона. Для орбиты движения частиц с минимальным радиусом выполняется условие квантования  $\pi r p = h$ , где  $r$  – радиус орбиты,  $p$  – импульс электрона или позитрона,  $h$  – постоянная Планка. Определите радиус этой орбиты. Ответ представьте в нанометрах и округлите до сотых. [0,85]

**8.8.10.** Атом мюония состоит из неподвижного протона и отрицательно заряженного мюона, масса которого в 206 раз больше массы электрона и зарядом, равным заряду электрона. Для ближайшей к протону орбиты мюона выполняется условие квантования  $\pi r p = h/2$ , где  $r$  – радиус орбиты,  $p$  – импульс мюона,  $h$  – постоянная Планка. Определите кинетическую энергию мюона на этой орбите. Ответ представьте в килоэлектронвольтах и округлите до десятых. [2,8]

**8.8.11.** Определите возраст минерала, в котором на один атом урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  приходится один атом свинца. Считать, что в момент образования минерала, свинец в минерале отсутствовал. Свинец образовался только в результате радиоактивного распада урана. Период полураспада урана

${}_{92}^{238}\text{U}$  равен  $4,5 \cdot 10^9$  лет. Полученный ответ (в годах) умножьте на  $10^{-9}$ . [4,5]

**8.8.12.** Радиоактивный препарат активностью  $2,7 \cdot 10^{11}$  Бк помещен в контейнер, заполненный водой при температуре 293 К. Какую массу воды можно довести до кипения за 3 ч, если известно, что данный препарат испускает  $\alpha$ -частицы энергией 5,3 МэВ? Теплоемкостью препарата, калориметра и теплообменом с окружающей средой пренебречь. Учтите, что энергия всех  $\alpha$ -частиц, испущенных препаратом, полностью поглощается водой. Ответ представьте в граммах и округлите до десятых. [7,4]

**8.8.13.** Ядро покоящегося нейтрального атома радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ , находясь в однородном магнитном поле, индукция которого 0,5 Тл, испытывает  $\alpha$ -распад. Масса  $M$  тяжелого иона равна  $3,752 \cdot 10^{-25}$  кг. Выделившаяся при  $\alpha$ -распаде энергия 4,871 МэВ полностью переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. Трек  $\alpha$ -частицы находится в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля. Начальная часть трека напоминает дугу окружности. Напишите уравнение  $\alpha$ -распада для данного случая и определите радиус начальной части трека  $\alpha$ -частицы. Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целого числа. [63]

**8.8.14.** В кровь пациента ввели  $1 \text{ см}^3$  раствора, содержащего искусственный радиоизотоп  ${}_{11}^{24}\text{Na}$ , период полураспада которого равен 15 ч. Активность  $1 \text{ см}^3$  крови, взятой у пациента через 5 ч, оказалась в 7300 раз ниже, чем у исходного раствора. Определите полный объем крови человека. Ответ представьте в литрах и округлите до десятых. [5,8]

**8.8.15.** Получение воды протекает по следующей реакции:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ . При получении двух молей воды выделяется энергия  $5,74 \cdot 10^5$  Дж. Определите уменьшение массы вещества (в микрограммах) при образовании воды в количестве  $10^3$  моль. Ответ округлите до десятых. [3,2]

**8.8.16.** Какое количество воды, взятой при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ ? Дефект массы ядра гелия  $4,81 \cdot 10^{-29}$  кг. Ответ представьте в тоннах и округлите до целого числа. [48]

**8.8.17.** Какое количество льда, взятого при  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , можно расплавить, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из прото-

нов и нейтронов 0,2 г гелия  ${}^4_2\text{He}$ ? Дефект массы ядра гелия  $4,81 \cdot 10^{-29}$  кг. Ответ представьте в тоннах и округлите до целого числа. [350]

**8.8.18.** Какое количество льда, взятого при температуре  $0^\circ\text{C}$ , можно полностью расплавить и полученную воду довести до кипения, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия  ${}^4_2\text{He}$ ? Дефект массы ядра гелия  $4,81 \cdot 10^{-29}$  кг. Ответ представьте в тоннах и округлите до целого числа. [174]

**8.8.19.** Определите массу спирта, при сжигании которого выделится столько же энергии, сколько ее выделяется при делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , если известно, что энергия, выделяемая при сжигании 1 кг спирта, равна  $3 \cdot 10^7$  Дж, а энергия, выделяемая при делении одного ядра урана, равна в среднем  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в тоннах и округлите до десятых. [2,7]

**8.8.20.** Определите массу водорода, при сжигании которого выделится столько же энергии, сколько ее выделяется при делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , если известно, что энергия выделяемая при делении одного ядра урана, равна в среднем  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Энергия, выделяемая при сжигании 1 кг водорода, равна  $1,2 \cdot 10^8$  Дж. Ответ представьте в тоннах и округлите до сотых. [0,68]

**8.8.21.** Какое количество нейтронов образуется в течение одной секунды в урановом реакторе, тепловая мощность которого 50 МВт, если при делении одного ядра урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  высвобождается энергия 200 МэВ и образуется в среднем 2,5 нейтронов. Полученный ответ умножьте на  $10^{-17}$  и округлите до целого числа. [39]

**8.8.22.** Электрическая мощность атомной электростанции, КПД которой 35 %, равна 200 МВт. Определите массу урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , расходуемого в течение суток, если известно, что при делении одного ядра этого элемента выделяется энергия, в среднем равная  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до десятых. [0,6]

**8.8.23.** Третий блок Белоярской атомной электростанции им. И.В. Курчатова имеет электрическую мощность 200 МВт при КПД, равном 40 %. Определите массу урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , расходуемого в течение суток, если известно, что при делении одного ядра этого элемента выделяется энер-

гия, в среднем равная  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в единицах СИ и округлите до сотых. [0,53]

**8.8.24.** Какова электрическая мощность атомной электростанции, расходующей 220 г урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в сутки и имеющей КПД 25 %? Энергия, выделяющаяся при делении одного ядра атома урана, равна 200 МэВ. Ответ представьте в мегаваттах и округлите до целого числа. [52]

**8.8.25.** Атомный реактор приводит в действие два турбогенератора одинаковой мощности при КПД, равном 35 % каждый. Определите мощность каждого турбогенератора, если ежесуточно расход урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  составляет 1,5 кг, а при делении одного ядра этого элемента выделяется энергия, в среднем равная  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в мегаваттах и округлите до целого числа. [249]

**8.8.26.** Атомный реактор приводит в действие три турбогенератора мощностью  $2 \cdot 10^8$  Вт каждый. Определите КПД турбогенератора, если ежесуточно расход урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  составляет 1,71 кг, а при делении одного ядра этого элемента выделяется энергия, в среднем равная  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [37]

**8.8.27.** Определите КПД двигателей атомного ледокола «Сибирь», если их мощность  $3,2 \cdot 10^4$  кВт, а атомный реактор расходует 200 г урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в сутки. Вследствие деления одного ядра атома урана выделяется энергия 200 МэВ. Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [17]

**8.8.28.** Для запуска спутника израсходовали 96 т топлива с удельной теплотой сгорания  $10^7$  Дж/кг. Определите массу урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , деление которого обеспечило бы запуск спутника. При делении одного ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется энергия  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Ответ представьте в граммах и округлите до целого числа. [12]

**8.8.29.** В результате реакции слияния неподвижных ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$  образуется новое ядро и нейтрон. Определите кинетическую энергию нейтрона. Зависимостью массы от скорости пренебечь. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах. [18,6]

**8.8.30.** Резерфорд наблюдал, что при лобовом столкновении с ядрами атомов меди  $\alpha$ -частица с энергией 5 МэВ отлетает назад с энергией 3,9 МэВ. Каково отношение масс ядра меди и  $\alpha$ -частицы? Ответ округлите до целого числа. [16]

**8.8.31.** При  $\beta^-$ -распаде покоящегося радиоактивного изотопа  ${}_{88}^{228}\text{Ra}$  из него вылетает электрон с кинетической энергией 0,05 МэВ. При этом изотоп радия превращается в изотоп  ${}_{89}^{228}\text{Ac}$ . Какую кинетическую энергию имеет атом актиния? Массы протона и нейтрона считать одинаковыми и равными  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Ответ представьте в электронвольтах и округлите до сотых. [0,12]

**8.8.32.** Нейтрон испытывает упругое соударение с ядром  ${}^4_2\text{He}$  и затем, отразившись, упруго соударяется с другим ядром  ${}^4_2\text{He}$ . Ядра гелия до соударения были неподвижны. Определите, во сколько раз изменится кинетическая энергия нейтрона после двух соударений. Принять массы нейтрона и протона одинаковыми. Ответ округлите до десятых. [7,7 или 0,1]

**8.8.33.** Какую долю полной энергии, освобождаемой при альфа-распаде ядра радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ , уносит  $\alpha$ -частица? Под полной энергией понимается суммарная кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы и оставшегося ядра. Массы протона и нейтрона считать одинаковыми. Ответ представьте в процентах и округлите до целого числа. [98]

**8.8.34.** С помощью камеры Вильсона, помещенной в однородное магнитное поле с индукцией 0,01 Тл, наблюдается упругое рассеяние  $\alpha$ -частицы на неподвижных ядрах дейтерия. Найдите начальную энергию  $\alpha$ -частицы, если радиусы кривизны начальных участков траекторий ядра дейтерия и  $\alpha$ -частицы после рассеяния оказались равными 0,1 м. Обе траектории лежат в плоскости перпендикулярной линиям индукции магнитного поля. Считать массу  $\alpha$ -частицы равной  $4m_p$ . Ответ представьте в электронвольтах и округлите до целого числа. [72]

**8.8.35.** \*Нейтральный  $\pi$ -мезон распался на лету на два  $\gamma$ -кванта с одинаковой энергией. Угол между направлениями разлета  $\gamma$ -квантов  $\theta = 60^\circ$ . Найдите кинетическую энергию  $\pi$ -мезона и энергию каждого  $\gamma$ -кванта. Энергия покоя  $\pi$ -мезона 135 МэВ. Ответ представьте в мегаэлектронвольтах и округлите до целого числа. [135; 135]



Приложение

ТАБЛИЦЫ КОНСТАНТ И ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1

Физические постоянные

Ускорение свободного падения	$g = 10 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Число Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный электрический заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная в законе Кулона	$k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Постоянная Фарадея	$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Радиус первой борховской орбиты	$a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Постоянная Ридберга	$R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ или $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$
Энергия связи электрона в атоме водорода (потенциал ионизации)	$E = 13,6 \text{ эВ}$
Температура	$0 \text{ К} = -273 \text{ }^\circ\text{С}$

Таблица 2

Плотность  $\rho$  некоторых веществ

Вещество	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Вещество	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
Алюминий	2,7	Сталь	8,0
Вода	1,0	Медь	8,9
Золото	19,3	Никель	8,8
Керосин	0,8	Ртуть	13,6
Лед	0,9	Серебро	10,5
Масло	0,8		

Таблица 3

**Удельная теплоемкость  $c$  некоторых веществ**

Вещество	$c$ , Дж/(кг·К)	Вещество	$c$ , Дж/(кг·К)
Вода	4200	Медь	380
Железо	500	Олово	200
Латунь	380	Свинец	130
Лед	2100	Сталь	460

Таблица 4

**Температура плавления  $t_{пл}$  и удельная теплота плавления  $\lambda$  некоторых веществ**

Вещество	$t_{пл}$ , °С	$\lambda$ , $10^3$ Дж/кг
Лед	0	330
Олово	230	60
Свинец	327	25
Сталь	1320	270

Таблица 5

**Молярная масса  $M$  некоторых веществ**

Газ	$M$ , $10^{-3}$ кг/моль	Газ	$M$ , $10^{-3}$ кг/моль
Азот, N <sub>2</sub>	28	Неон, Ne	20
Аргон, Ar	40	Никель, Ni	58,7
Водород, H <sub>2</sub>	2	Озон, O <sub>3</sub>	48
Воздух	29	Углекислый газ CO <sub>2</sub>	44
Гелий, He	4	Углерод, C	12
Кислород, O <sub>2</sub>	32	Уран-235	235
Медь, Cu	64		

Таблица 6

**Некоторые физические характеристики**

Нормальное атмосферное давление	$p_0 = 10^5$ Па
Температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении	$t = 100$ °С
Удельная теплота парообразования (испарения) воды	$r = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг
Удельная теплота сгорания бензина	$q = 4,5 \cdot 10^7$ Дж/кг
Скорость звука в воздухе	$v_{зв} = 340$ м/с
Скорость звука в стали	$v_{ст} = 5 \cdot 10^3$ м/с
Температурный коэффициент сопротивления вольфрама	$\alpha = 1/273$ К <sup>-1</sup>

Таблица 7

**Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  некоторых диэлектриков**

Диэлектрик	$\epsilon$	Диэлектрик	$\epsilon$	Диэлектрик	$\epsilon$
Вода	81	Парафин	2,0	Спирт 80 %	26
Воздух	1,00058	Парафинированная бумага	2,0	Стекло	6,0
Воск	7,8	Плексиглас	3,5	Фарфор	5,0
Керосин	2,0	Полиэтилен	2,3	Эбонит	2,7
Масло (трансф)	2,25	Слюда	7,0		

Таблица 8

**Показатели преломления  $n$  некоторых веществ**

Вещество	$n$	Вещество	$n$
Алмаз	2,4	Сапфир $Al_2O_3$	1,6
Вода	1,33	Стекло	1,5
Воздух	1,00029	Фтористый магний	1,4
Кварц плавленный	1,46		

Таблица 9

**Работа выхода  $A_v$  электрона из некоторых металлов**

Металл	$A_v$ , эВ	Металл	$A_v$ , эВ
Литий	2,39	Цинк	3,74
Никель	4,84	Цезий	1,89

Таблица 10

**Соотношение между различными атомными единицами**

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
1 атомная единица массы эквивалентна	931,5 МэВ
1 электронвольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Таблица 11

**Масса  $m_0$  покоя некоторых элементарных частиц**

Электрон	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Протон	$1,673 \cdot 10^{-27} \approx 1,007 \text{ а.е.м.}$
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27} \approx 1,008 \text{ а.е.м.}$

Таблица 12

Энергия  $E_0$  покоя ядер и элементарных частиц

Ядро (частица)	Символ	$E_0$ , МэВ	Ядро	Символ	$E_0$ , МэВ
Электрон	$e$	0,51	Бериллий	${}^9_4\text{Be}$	8392,8
Протон	$p$	938,3	Бор	${}^{10}_5\text{B}$	9324,4
Нейтрон	$n$	939,6	Углерод	${}^{11}_6\text{C}$	10 254,1
Водород	${}^1_1\text{H}$	938,3	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	11 174,9
Дейтерий	${}^2_1\text{H}$	1875,6	Углерод	${}^{13}_6\text{C}$	12 109,5
Тритий	${}^3_1\text{H}$	2809,4	Азот	${}^{13}_7\text{N}$	12 111,29
Гелий	${}^4_2\text{He}$	3727,4	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	13 040,3
Литий	${}^7_3\text{Li}$	6533,8	Кислород	${}^{17}_8\text{O}$	15 830,6
Бериллий	${}^7_4\text{Be}$	6534,24			

Таблица 13

## Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Средний радиус Земли	6400 км
Масса Земли	$6 \cdot 10^{24}$ кг
Средний радиус Солнца	$7 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$2 \cdot 10^{30}$ кг
Среднее расстояние от Земли до Солнца	$1,5 \cdot 10^{11}$ м (1 а.е.)
Радиус Луны	1740 км
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22}$ кг
1 год	$3 \cdot 10^7$ с

Таблица 14

## Некоторые десятичные приставки к названиям единиц

Наименование	тера	гига	мега	микро	нано	пико	фемто	атто
Приставка	Т	Г	М	мк	н	п	ф	а
Множитель	$10^{12}$	$10^9$	$10^6$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$	$10^{-18}$

**Некоторые приближенные числа и  
тригонометрические функции некоторых углов**

$\pi = 3,14$	$\pi^2 \approx 10$
$\ln 2 \approx 0,69$	$\lg 2 \approx 0,30$
$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\sqrt{3} \approx 1,73$
$\sqrt{5} \approx 2,236$	$\sqrt{7} \approx 2,646$
$\sin \frac{\pi}{3} = \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$	$\sin \frac{\pi}{4} = \cos \frac{\pi}{4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$
$\sin \frac{\pi}{2} = \cos 0^\circ = 1$	$\cos \frac{\pi}{2} = \sin 0^\circ = 0$
$\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} = \operatorname{ctg} \frac{\pi}{4} = 1$	$\operatorname{tg} \frac{\pi}{6} = \operatorname{ctg} \frac{\pi}{3} = 0,577$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханнанов Н.К., Никифоров Г.Г., Орлов В.А.. Физика. Сборник заданий ЕГЭ 2014. – М.: Эксмо, 2013. – 239 с.
2. Орлов В.А., Демидова М.Ю., Никифоров Г.Г., Ханнанов Н.К. Единый государственный экзамен 2010. Физика. Универсальные материалы для подготовки учащихся / ФИПИ. – М.: Интеллект-Центр, 2010. – 224 с.
3. Вишнякова Е.А., Макаров В.А., Семенов М.В. и др. Отличник ЕГЭ. Физика. Решение сложных задач. / ФИПИ. – М.: Интеллект-Центр, 2010. – 368 с.
4. Веретельник В.И., Поздеева Э.В., Рудковская В.Ф., Сёмкина Л.И., Сивов Ю.А., Толмачева Н.Д., Хоружий В.Д.. Физика. Тренинговые задания: в 2-х частях. – Томск: ТПУ, 2006. – 346 с.
5. Толмачева Н.Д. Краткий справочник по физике – Томск: ТПУ, 2011. – 115 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>5. Постоянный ток. Электромагнетизм</b> .....	3
Содержание раздела .....	3
Основные законы и формулы .....	3
Примеры решения задач .....	8
Задачи для самостоятельного решения .....	21
<b>6. Колебания и волны</b> .....	52
Содержание раздела .....	52
Основные законы и формулы .....	52
Примеры решения задач .....	57
Задачи для самостоятельного решения .....	74
<b>7. Оптика. Световые кванты</b> .....	103
Содержание раздела .....	103
Основные законы и формулы .....	103
Примеры решения задач .....	107
Задачи для самостоятельного решения .....	126
<b>8. Специальная теория относительности. Физика атома и атомного ядра</b> .....	156
Содержание раздела .....	156
Основные законы и формулы .....	156
Примеры решения задач .....	160
Задачи для самостоятельного решения .....	173
Приложение .....	201
Список литературы .....	206

Учебное издание

ВЕРЕТЕЛЬНИК Владимир Иванович  
СИВОВ Юрий Александрович  
ТОЛМАЧЕВА Нелла Дмитриевна  
ХОРУЖИЙ Владимир Дмитриевич

## **СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В ВУЗЫ**

**Часть II**

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка *В.М. Толмачев*  
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 07.07.2015. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 12,56. Уч.-изд. л. 11,36.  
Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)