

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра «Физика-2»

# СБОРНИК ЗАДАЧ

по дисциплине «Физика»

*Под общей редакцией профессора С.М. Кокина*

Москва – 2006

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра «Физика-2»

# СБОРНИК ЗАДАЧ

по дисциплине «Физика»

*Под общей редакцией профессора С.М. Кокина*

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов ИУИТ и ИСУТЭ

Москва - 2006

УДК 530.1 (076)  
К-55

Сборник задач по дисциплине «Физика» / Под общ. ред. проф.  
С.М. Кокина – М.: МИИТ, 2006. – 144 с.

Сборник задач по курсу общей физики предназначен для студентов первого и второго курса институтов ИУИТ, ИСУТЭ, ИЭФ, ИТОПП Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Задачи составили: Т.В. Захарова, Л.М. Касименко, С.М. Кокин, В.Г. Колотилова, А.Н. Кушко И.А. Лямзова, С.В. Мухин, В.А. Никитенко, А.В. Пауткина, И.В. Пыканов, В.А. Селезнев, С.Г. Стоюхин.

*Рецензенты* А.Д.Курушин, профессор, зав. кафедрой «Физика-1» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ);  
Е.К.Силина, профессор, зав. кафедрой физики и химии Российского государственного открытого технического университета путей сообщения

© Московский государственный  
университет путей сообщения  
(МИИТ), 2006

### Некоторые справочные данные:

Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения	$g = 9,8 \text{ м/с}^2$
Масса покоя свободного нейтрона	$m_n = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя свободного протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Элементарный электрический заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Планка	$\hbar = 1,03 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина (в законе смещения)	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Границы видимой области спектра	От 380 нм ÷ 400 нм до 760 нм ÷ 780 нм.
Нормальные атмосферные условия	$p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}, T = 273 \text{ К}$
Радиус Земли (средний)	$R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$

## Тема 1.

## КИНЕМАТИКА

**1.1.** Материальная точка движется вдоль оси ОХ, при этом зависимость её координаты от времени имеет вид:  $x = 2 - t + 3t^3$  (м). Чему равна скорость точки в момент времени, когда её ускорение равно нулю?

**1.2.** Координата материальной точки, движущейся по прямой вдоль оси ОХ, меняется по закону  $x = 1 + 8t - 2t^2$  (м). Какой путь пройдёт точка: а) за 1 с? б) за 3 с?

**1.3.** Движение материальной точки по плоскости описывается уравнением  $\vec{r}(t) = (19 - 1,5t^2)\vec{i} + (-2 + 2t^2)\vec{j}$ , где  $\vec{i}$  и  $\vec{j}$  – единичные вектора вдоль осей ОХ и ОУ прямоугольной декартовой системы координат (расстояние измеряется в метрах). Запишите уравнения, описывающие изменение со временем скорости и ускорения точки. Пользуясь этими уравнениями, вычислите значения модулей скорости и ускорения точки через 2 с после начала движения.

**1.4.** Скорость локомотива при движении по прямой меняется по закону  $v = 0,02t + 0,003t^2$  (м/с). Чему равна средняя скорость локомотива за вторую минуту движения?

**1.5.** Локомотив, двигаясь со скоростью 36 км/ч, начинает тормозить и до полной остановки за 20 с проходит расстояние 80 м. Можно ли считать его движение равнозамедленным?

**1.6.** Начиная движение из точки с координатой  $x = 25$  м, дрезина следует по прямому участку пути так, что её ускорение меняется со временем по закону  $a = 0,01 + 0,002t$  (м/с<sup>2</sup>). а) Вычислите координату точки, в которой дрезина окажется через минуту после начала движения. б) Во сколько раз будут отличаться скорость дрезины к концу этой минуты от её средней путевой скорости?

**1.7.** Две трети пути от станции до станции поезд движется со скоростью 9 м/с, но при этом запаздывает (по сравнению с расписанием). Для того, чтобы «нагнать время», оставшееся расстояние он движется со скоростью 129,6 км/ч. Чему при этом оказывается равной средняя путевая скорость поезда?

**1.8.** От светофора одновременно начинают параллельно двигаться путевой обходчик и маневровый тепловоз, при этом человек идет с постоянной скоростью  $3 \text{ м/с}$ , а тепловоз разгоняется с постоянным ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Через какое время тепловоз поравняется с обходчиком, и какая у него будет при этом скорость?

**1.9.** Проехав железнодорожный переезд, первые  $200 \text{ м}$  локомотив двигался с постоянной скоростью  $v$ , а затем тормозился с ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ . При какой скорости локомотива  $v$  время, прошедшее с момента пересечения им переезда до полной остановки, будет наименьшим?

**1.10.** По параллельным путям железной дороги в одном и том же направлении без остановки следуют тепловоз и электровоз. В момент времени, когда тепловоз поравнялся с будкой обходчика, он двигался равноускоренно с ускорением  $0,6 \text{ м/с}^2$  и скоростью  $1,8 \text{ км/ч}$ . Электровоз проезжает мимо будки через  $10 \text{ с}$  после тепловоза, его скорость в этот момент времени равна  $72 \text{ км/ч}$ , но он тормозит: движется равнозамедленно с ускорением  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Считая оба локомотива материальными точками, определите, догонит ли электровоз тепловоз.

**1.11.** Расстояние между двумя станциями равно  $3 \text{ км}$ . Отправляясь от первой станции, первую часть этого расстояния электричка проходит равноускоренно с ускорением  $a_1$ , а вторую – равнозамедленно с вдвое большим ускорением, останавливаясь у второй станции. При этом максимальная скорость электрички составляет  $54 \text{ км/ч}$ . Определите ускорение  $a_1$  электрички.

**1.12.** С площадки открытого строительного лифта, опускающегося вертикально вниз с постоянной скоростью  $2 \text{ м/с}$ , в момент времени, когда он находился на высоте  $20 \text{ м}$ , вертикально вверх бросили камушек со скоростью  $19,6 \text{ м/с}$  относительно лифта. На какой высоте окажется камушек в тот момент времени, когда он догонит лифт? Размерами лифта и сопротивлением воздуха пренебречь.

**1.13.** Первое тело падает с высоты  $180 \text{ м}$  без начальной скорости. Одновременно с земли вертикально вверх бросают второе тело с начальной скоростью  $20 \text{ м/с}$ . Каким окажется расстояние (по

вертикали) между телами через 3 с? Сопротивлением воздуха и размерами тел пренебречь.

**1.14.** Скорость течения реки от берегов к центру возрастает по закону  $v = 2y$  (м/с), где  $y$  – расстояние до ближайшего берега. Ширина реки 20 м. В направлении, перпендикулярном берегу, в воду ныряет пловец, который пытается пересечь реку, скорость пловца относительно воды равна 1 м/с. На какое расстояние вниз по течению снесёт пловца, пока он не достигнет противоположного берега?

**1.15.** Из мелкокалиберной винтовки стреляют вертикально вверх. Определите, через какое время  $t$  пуля упадет на землю, если известно, что максимальная высота её подъема составила 196 м. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**1.16.** У края обрыва камень бросают практически вертикально вверх, в результате чего он, опускаясь вниз, пролетает мимо человека, который его бросал, и падает на дно оврага. Выбрав ось координат с началом в точке бросания, и направив её вертикально вверх, начертите зависимости от времени: а) для модуля вектора скорости камня; б) для пути, пройденного камнем за время падения; в) для модуля вектора перемещения камня.

**1.17.** Камень бросают вертикально вверх с начальной скоростью 24,5 м/с. Вычислите: а) путь, который проходит камень за третью секунду полёта, и б) – его перемещение за это же время. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**1.18.** Из окна поезда, движущегося по прямой со скоростью 72 км/ч, перпендикулярно направлению его движения бросили предмет с направленной горизонтально скоростью 10 м/с относительно вагона. Чему будет равна скорость этого предмета относительно земли через 0,5 с полёта?

**1.19.** Орудие, установленное на башне высотой  $H = 22,5$  м, производит выстрел вверх под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту. Скорость вылета снаряда из ствола  $v_0 = 15$  м/с. Найти: а) время  $\tau$  полета снаряда; б) дальность  $L$  полета снаряда в горизонтальном направлении; в) скорость  $v$  снаряда в момент падения на землю; г) угол  $\varphi$ , составляемый скоростью с поверхностью земли в момент падения

снаряда на землю; д) максимальную высоту  $H_{\max}$  полета снаряда над уровнем земли. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**1.20.** Орудие, установленное на земле, производит выстрел под углом  $30^\circ$  к горизонту. Скорость вылета снаряда из ствола  $15 \text{ м/с}$ . На расстоянии  $10 \text{ м}$  от орудия по горизонтали расположена вертикальная стена. Найти, на какой высоте (отсчитываемой от поверхности земли) снаряд попадет в эту стену. По восходящей или по нисходящей части траектории движется снаряд в момент его попадания в стену?

**1.21.** Камень бросают с поверхности земли под углом  $30^\circ$  к горизонту с начальной скоростью  $20 \text{ м/с}$ . Начертите графики зависимости от времени: а) вертикальной компоненты скорости камня; б) горизонтальной компоненты скорости камня; в) модуля полной скорости камня. Сопротивлением воздуха пренебречь.

**1.22.** Камень бросили горизонтально со скоростью  $v = 10 \text{ м/с}$ . Вычислите тангенциальную составляющую ускорения  $a_t$  и радиус  $R$  кривизны траектории камня через  $t = 3$  секунды полёта.

**1.23.** Во сколько раз путь, проходимый за сутки концом минутной стрелки настенных часов, больше пути, проходимого концом часовой стрелки за это же время? Длина минутной стрелки  $10 \text{ см}$ , длина часовой –  $6 \text{ см}$ .

**1.24.** Колесо вращается так, что его угловая скорость меняется со временем по закону  $\omega = 2 + 2t$  (рад/с). Сколько полных оборотов совершит колесо за первые  $20 \text{ с}$  вращения?

**1.25.** Может ли современный локомотив развить такую скорость, чтобы, двигаясь по участку проложенного вдоль экватора железнодорожного полотна, полностью компенсировать вращение Земли: то есть, двигаться так, чтобы солнце для него всё время оставалось на одной высоте над горизонтом?

**1.26.** Барабан стиральной машины при отжиме белья вращается с угловой скоростью  $3140 \text{ рад/мин}$ . После окончания отжима, вращаясь равнозамедленно, барабан сделал до остановки  $50$  оборотов. Определите, сколько проходит времени с окончания отжима до полной остановки барабана.



**1.27.** Диск радиусом 50 см, вращавшийся с угловой скоростью 10 рад/с, начинает тормозиться с постоянным угловым ускорением 3 рад/с<sup>2</sup>. Для точек на ободе диска определите, какими станут к концу второй секунды торможения: а) их линейная скорость, б) их тангенциальное, нормальное и полное ускорения, в) угол между векторами полного ускорения и линейной скорости.

**1.28.** Угол поворота колеса радиусом 10 см вокруг оси, совпадающей с осью его симметрии, меняется со временем по закону  $\varphi = 10 + 2t + 4t^2 + t^3$  (рад). Найдите полное линейное ускорение точек на ободе колеса в момент времени, когда их линейная скорость станет равной 1,3 м/с.

**1.29.** Ведро, привязанное к веревке, которая намотана на горизонтальный ворот радиусом 10 см, двигаясь равноускоренно, опускается в колодец на глубину 3 м. Определите, каким к этому моменту времени станет отношение значений нормального и тангенциального ускорений точек на ободе ворота, считая, что начальная скорость ведра была равна нулю.

**1.30.** Точка движется по окружности так, что модуль её скорости меняется по закону  $v = 0,5t$  (см/с). Найти полное ускорение точки в момент времени, когда (с начала движения) она пройдет 0,2 длины окружности.

## Тема 2. ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**2.1.** Под действием постоянной силы 100 Н тело массой 500 г движется так, что зависимость пройденного им пути от времени выглядит следующим образом:  $S = 2At + 5Ct^2 + 16$  (м), где  $A$  и  $C$  – некоторые константы. Вычислите значение константы  $C$ .

**2.2.** Тело массой 5 кг движется по плоскости так, что его координаты меняются со временем следующим образом:  $x = 3t + 5t^2$  (м),  $y = t^3 - 4t^2$  (м). Вычислите значение силы, которая будет действовать на тело к концу третьей секунды его движения.

**2.3.** Координата тела массой 0,5 кг, движущегося вдоль некоторой оси  $OX$ , меняется по закону  $x = 1 + 8t - 2t^2$  (м). Постройте графики зависимости от времени для импульса тела и для действующей на него результирующей силы.

**2.4.** Высота подъёма вертикально взлетающей ракеты меняется со временем по закону  $h = t + 10t^2 + 2t^3 + 0,2t^4$  (м). Полагая, что сила тяги ракеты постоянна и равна  $6,24 \times 10^6$  Н, вычислите, чему равна масса ракеты к концу десятой секунды полёта. Изменением силы тяжести с высотой пренебречь.

**2.5.** Рессорная пружина вагонной тележки под действием нагрузки в 1 т сжимается на 1 см. Сколько пружин следует установить, чтобы общий коэффициент жёсткости рессор одного вагона оказался равен  $1,57 \times 10^7$  Н/м?

**2.6.** Товарный поезд после начала экстренного торможения полностью останавливается лишь спустя полторы минуты. Коэффициент трения скольжения при торможении равен 0,1. Чему равна длина  $L$  тормозного пути поезда?

**2.7.** К потолку лифта, который опускается вниз с ускорением  $a = 1 \text{ м/с}^2$ , прикреплена пружина жесткостью  $k = 30$  Н/см, на которой висит тело массой  $m_1 = 1$  кг. К этому телу прикреплена такая же пружина, на которой висит второе тело массой  $m_2 = 2$  кг. Найдите растяжение  $x$  верхней пружины. Массой пружин пренебречь.

**2.8.** Какой угол с горизонтом составляет поверхность чая в стакане, стоящем в купе вагона скоростного поезда Москва – Санкт-Петербург, если состав разгоняется за три минуты из состояния покоя до скорости 200 км/ч?

**2.9.** В системе, изображенной на рис. 2.1, тело массой  $m = 2$  кг, лежащее на гладкой горизонтальной поверхности ВС, за 5 с после начала движения прошло путь 2 м. Определите коэффициент трения между телом массой  $m_2 = 2$  кг и поверхностью CD, если коэффициент трения  $k$  между телом массой  $m_1 = 1$  кг и поверхностью АВ равен  $1/(2\sqrt{3})$ . Угол  $\alpha = 30^\circ$ , угол  $\beta = 45^\circ$ . Массой нитей и блоков пренебречь; трение в блоках отсутствует.

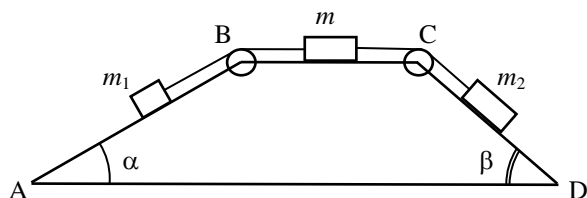


Рис. 2.1

**2.10.** На наклонную плоскость с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$  помещены два соприкасающихся бруска массами  $m_1 = 2$  кг и  $m_2 = 1$  кг (рис. 2.2). Коэффициенты трения брусков о плоскость равны  $\mu_1 = 0,4$  и  $\mu_2 = 0,2$  соответственно. Определите ускорение  $a$  брусков.

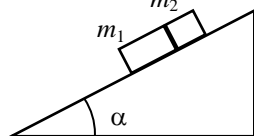


Рис. 2.2

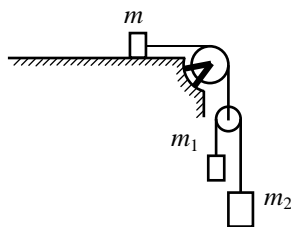


Рис. 2.3

**2.11.** На наклонную плоскость с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$  помещены два соприкасающихся бруска массами  $m_1 = 2$  кг и  $m_2 = 1$  кг (рис. 2.2). Коэффициенты трения брусков о плоскость равны 0,2 и 0,4 соответственно. Определите ускорение брусков.

**2.12.** В системе, изображенной на рис. 2.3, массы грузов составляют  $m_1 = 1$  кг,  $m = m_2 = 3$  кг. Найти ускорение груза  $m$ . Блок и нити считать невесомыми, возможным растяжением нитей и трением в системе пренебречь.

**2.13.** К потолку вагона поезда, следующего на подъём с ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ , на невесомой нити подвешен груз массой  $2 \text{ кг}$ . Определите угол отклонения нити от вертикали. Уклон горы составляет  $10 \text{ м}$  на  $1 \text{ км}$  пути.

**2.14.** Тело скользит вверх по наклонной плоскости, имеющей угол наклона  $\alpha = 30^\circ$ , с начальной скоростью  $v = 13,2 \text{ м/с}$ . Коэффициент трения тела о плоскость  $\mu = 0,2$ . Сколько времени  $t$  будет двигаться тело вверх до остановки?

**2.15.** Тело подтолкнули вверх по наклонной плоскости, имеющей угол наклона  $30^\circ$ , с начальной скоростью  $11,7 \text{ м/с}$ . Достигнув некоторой точки, тело на мгновение останавливается и начинает скользить вниз. Сколько времени будет продолжаться движение тела от верхней точки траектории до основания наклонной плоскости? Коэффициент трения тела о плоскость равен  $0,35$ .

**2.16.** По наклонной плоскости, составляющей угол  $30^\circ$  с горизонтом, съезжает тело без начальной скорости. Определить коэффициент трения скольжения, считая его на всем пути одинаковым, если известно, что после съезда на горизонтальную поверхность до полной остановки тело прошло такое же расстояние, что и по наклонной плоскости.

**2.17.** На автогонках «Формула-1» один из виражей имеет радиус кривизны  $200 \text{ м}$ . Вычислите максимальное значение скорости, которую может иметь болид гонщика при прохождении этого виража с тем, чтобы не вылететь с трассы, если коэффициент трения покрышек о полотно трассы равен  $0,4$ . Ответ выразите в  $\text{км/ч}$ .

**2.18.** Тело массой  $0,6 \text{ кг}$ , прикреплённое к невесомой пружине, вращается в горизонтальной плоскости по окружности, совершая два оборота за секунду (точка крепления пружины к оси вращения принадлежит той же плоскости). Определите радиус окружности, описываемой телом, если известно, что длина нерастянутой пружины равна  $10 \text{ см}$ , и что для её растяжения на  $1 \text{ см}$  требуется усилие  $6 \text{ Н}$ .

**2.19.** На горизонтальной вращающейся платформе, на расстоянии  $2 \text{ м}$  от оси вращения, лежит маленький брусок. Угол поворота платформы описывается уравнением  $\varphi = 0,5t^2$  (рад). Через какое

время после начала движения брусок заскользит по платформе, если известно, что коэффициент трения бруска о платформу равен 0,4?

**2.20.** Радиус некоторой планеты  $R = 5000$  км, её средняя плотность  $\rho = 6$  г/см<sup>3</sup>. Вычислите период  $T$  обращения вокруг этой планеты искусственного спутника, летающего по круговой орбите на высоте  $H = 500$  км над поверхностью планеты.

**2.21.** Два искусственных спутника летают вокруг некоторой планеты по круговым орбитам. Радиус орбиты спутника, летящего со скоростью 5,5 км/с, составляет 5000 км. Определить скорость второго спутника, у которого радиус орбиты на 200 км больше чем у первого.

**2.22.** Определить радиус планеты, если известно, что период обращения искусственного спутника, летающего вокруг нее по круговой орбите, составляет 1 час, а любой предмет, отделившийся от спутника без начальной скорости (относительно планеты), начинает падать на планету с ускорением 8 м/с<sup>2</sup>.

**2.23.** Первые космические скорости для двух планет (которые можно считать идеальными шарами равной плотности) отличаются в 1,5 раза. Во сколько раз отличаются радиусы этих планет?

**2.24.** Вычислите значение силы, с которой материальная точка массой 2 г, помещенная в центре тонкого полукольца массой 10 г и радиусом 10 см, притягивается к этому полукольцу.

**2.25.** Рассчитайте силу  $F_0$  притяжения материальной точки массой  $m = 5$  г к тонкому стержню массой  $M = 100$  г и длиной  $l = 1$  м. Точка находится на одинаковом расстоянии в  $r = l = 1$  м от концов стержня. Во сколько раз изменится сила притяжения, если стержень будет бесконечно длинным?

**2.26.** С высоты 2 м на стальную плиту свободно падает стальной шарик массой 100 г. После удара (который длился 0,1 с) шарик подпрыгивает на высоту 1,5 м. Найти среднюю силу, с которой шарик действовал на плиту во время удара.

**2.27.** Из сопла двигателя летящей в космосе ракеты равномерной струей со скоростью 400 м/с относительно корпуса выбрасывается поток газов. Определите реактивную силу тяги двигателя

при расходе горючего  $0,15 \text{ кг/с}$  и ускорение ракеты в тот момент времени, когда её масса вместе с запасом горючего составляет  $1,5 \text{ т}$ .

**2.28.** Тело массой  $400 \text{ г}$  первоначально двигалось со скоростью  $4 \text{ м/с}$ . Под действием некоторой силы за  $2 \text{ с}$  величина скорости возросла до  $5 \text{ м/с}$ , а направление движения тела изменилось на  $60^\circ$ . Вычислите среднее значение силы, действовавшей на тело в течение этого времени.

**2.29.** Из водоема с помощью подъемного крана вертикально вверх с ускорением  $a = 3 \text{ м/с}^2$  поднимают стальную балку длиной  $l = 2 \text{ м}$  и площадью поперечного сечения  $S = 100 \text{ см}^2$ . Балка одним концом привязана к тросу. Когда над поверхностью оказалась четвертая часть балки, трос оборвался. Определить максимальное натяжение  $T$ , которое выдерживает трос. Плотность стали  $\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$ , плотность воды  $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ . Трением балки о воду пренебречь.

**2.30.** Воздушный шар практически неподвижно висит над землей на высоте  $168 \text{ м}$ . На короткое время в оболочке открывают клапан, газ выходит, объём шара быстро уменьшается, и шар начинает опускаться. Через какое время шар опустится на землю, если в результате проделанной операции его объём уменьшился на  $2,5 \%$ ? Сопротивлением воздуха пренебречь. Плотность газа, заполняющего шар, в  $7$  раз меньше плотности окружающего воздуха.

**2.31.** На столе лежит брусок массой  $m = 4 \text{ кг}$ , к которому привязан один конец невесомого и нерастяжимого шнура, перекинутого через невесомый блок, укрепленный на краю стола (рис. 2.4). Другой конец шнура привязан к алюминиевому грузу массой  $M = 10 \text{ кг}$  (плотность алюминия  $2,7 \text{ г/см}^3$ ), который полностью погружен в воду. Коэффициент трения бруска о стол равен  $0,2$ , трения на оси блока нет; шнур невесом и нерастяжим. Найти ускорение системы и натяжение шнура. Сопротивлением воды движению груза  $M$  пренебречь.

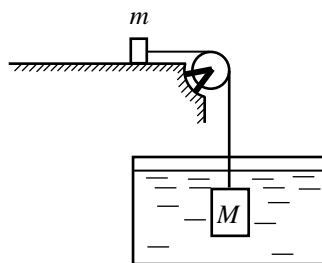


Рис. 2.4

### Тема 3. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

**3.1.** Гантель состоит из двух одинаковых шаров радиусом 4 см, закрепленных на концах тонкого стержня длиной 20 см. Массы шаров – по 5 кг, масса стержня – 400 г. Найти момент инерции гантели относительно оси: а) проходящей через середину стержня параллельно стержню; б) проходящей через середину стержня перпендикулярно стержню; в) проходящей через точку соединения стержня с одним из шаров перпендикулярно стержню.

**3.2.** Найти момент инерции квадратной проволочной рамки со сторонами по 20 см и массой 100 г каждая относительно оси, проходящей через центр рамки параллельно двум из её сторон и перпендикулярно двум другим.

**3.3.** Два однородных тонких стержня одинаковой длины  $l = 50$  см и одинаковой массы  $m = 300$  г скреплены под прямым углом образуя букву Т (см. рис. 3.1). Чему равен момент инерции  $I$  системы относительно оси  $OO_1$ , проходящей через конец одного стержня параллельно другому?

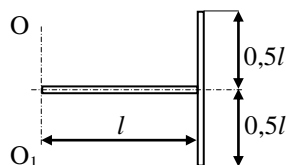


Рис. 3.1

**3.4.** Маятник представляет собой тонкое кольцо радиусом  $R = 10$  см и массой  $m = 500$  г, подвешенное на невесомом тонком стержне длиной  $l = 0,4$  м (рис. 3.2). Определите момент инерции маятника относительно оси, вокруг которой происходят колебания.

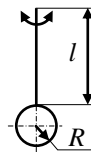


Рис. 3.2

**3.5.** На рис. 3.3. изображен вид сверху на систему, состоящую из трёх одинаковых скрепленных вместе однородных цилиндров массой по  $M = 3$  кг и радиусом  $R = 5$  см каждый. Вычислите момент инерции  $I$  системы относительно оси, проходящей через точку, равноудалённую от центров цилиндров параллельно их осям.

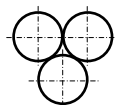


Рис. 3.3

**3.6.** Найти момент инерции однородного плоского тела с вырезом, изображенного на рис. 3.4, относительно оси, которая проходит

через центр большой окружности перпендикулярно плоскости рисунка. Радиус большой окружности  $R = 12$  см; масса тела равна 400 г.

**3.7.** Маховик в виде однородного диска массой 0,2 т и радиусом 50 см вращается с частотой 10 об/с. **Определите величину силы трения в тормозной колодке** (рис. 3.5), под действием которой маховик останавливается за  $1/3$  минуты.

**3.8.** Тонкий однородный стержень длиной  $l = 50$  см и массой  $m = 300$  г вращается с угловым ускорением  $\varepsilon = 3$  рад/с<sup>2</sup> вокруг оси, проходящей перпендикулярно стержню на расстоянии  $0,4l$  от его конца. Определите вращающий момент сил  $M$ .

**3.9.** Маховик в виде диска радиусом  $R = 20$  см и массой  $m = 50$  кг двигателем раскрутили до частоты вращения  $f = 480$  об/мин. После выключения двигателя вследствие трения маховик остановился через  $t = 50$  с. Найти момент сил трения, считая его постоянным.

**3.10.** Однородная жёсткая спица длиной 1 м и массой 100 г под действием момента сил 0,4 Н·м начинает вращаться в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси, проходящей через один из концов спицы. Вычислите угловую скорость спицы через 3 с после начала движения и рассчитайте, чему равно центростремительное ускорение середины спицы в этот момент времени.

**3.11.** Через блок (однородный диск массой 2 кг и радиусом 10 см) перекинута невесомая и нерастяжимая нить, к концам которой привязаны грузы с массами 100 г и 300 г. Найти ускорение, с которым движутся грузы, и силы натяжения нити по обе стороны блока. Нить считать невесомой и нерастяжимой; трения на оси блока нет, проскальзывание нити по поверхности блока отсутствует.

**3.12.** Колесо изготовлено в виде тонкого обруча массой  $M = 300$  г и радиусом  $R = 30$  см с тремя спицами массой  $m = 40$  г каждая. В плоскости колеса к его ободу под углом  $\alpha = 30^\circ$  к радиусу приложена сила  $F$ , под действием которой оно без трения вращается относительно своей оси. Угол поворота колеса меняется со временем по закону  $\varphi = 5t^2$  (рад). Чему равна величина силы  $F$ ?

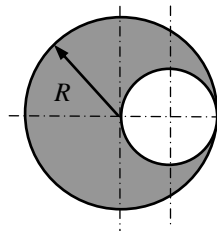


Рис. 3.4

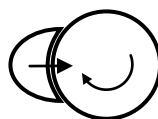


Рис. 3.5



**3.13.** Два одинаковых шара радиусами 6 см и массой 2,5 кг каждый закреплены на вертикальной оси так, как показано на рис. 3.6. Вращаясь вокруг этой оси равноускоренно, система через 10 с раскрутилась из состояния покоя до скорости 1200 об/мин. Найти момент силы, раскручивающей шары.

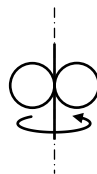


Рис. 3.6

**3.14.** В стержень, вращающийся с угловой скоростью  $\omega = 7$  рад/с вокруг горизонтальной оси, которая проходит через его центр (перпендикулярно плоскости рисунка 3.7), попадает пуля массой  $m = 10$  г. Пуля летела горизонтально по прямой, отстоящей от оси вращения на расстояние  $h = 40$  см, а застряла в нем в тот момент времени, когда стержень оказался перпендикулярен направлению её полёта. Определите угловую скорость  $\Omega$ , с которой после этого стал вращаться стержень. До попадания в стержень скорость пули относительно земли равнялась  $v = 500$  м/с и была направлена противоположно линейной скорости той точки стержня, в которую она попала. Длина стержня  $l = 1$  м, масса  $M = 1$  кг.

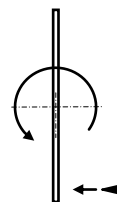


Рис. 3.7

**3.15.** Тонкий металлический обруч массой 1 кг и радиусом 50 см равномерно вращается вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости обруча. Обруч делает 10 оборотов в секунду. Какой момент сил следует приложить к обручу с тем, чтобы через 15 с его момент импульса оказался равен  $4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ?

**3.16.** Найти отношение моментов импульсов минутной и часовой стрелок настенных часов, считая эти стрелки однородными одинаковыми по толщине стержнями, изготовленными из одного материала. Принять длину часовой стрелки равной двум третям длины минутной стрелки.

**3.17.** Вертикально стоящий столб высотой 4 м и массой 50 кг начал падать так, что его нижняя точка остаётся на одном месте. Определите, чему равен момент импульса столба относительно точки опоры в момент его удара о землю.

**3.18.** Однородный шар радиусом 5 см и массой 1 кг катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью

4 м/с. Вычислите момент импульса шара: а) относительно центра шара; б) относительно точки касания шаром плоскости.

**3.19.** Однородный диск массой 10 кг равномерно вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр. На краю этого диска вертикально стоит тонкий стержень массой 3 кг и длиной, равной радиусу диска. Во сколько раз изменится скорость вращения диска, если стержень упадет на диск вдоль его радиуса?

**3.20.** На краю горизонтально расположенной платформы – диска массой 200 кг и радиусом 2 м стоит человек массой 80 кг. Платформа вращается с угловой скоростью 0,5 рад/с вокруг вертикальной оси, проходящей через её центр. Рассматривая человека, как материальную точку, определите, с какой угловой скоростью станет вращаться платформа, если человек пройдет по радиусу к центру расстояние 1 м.

**3.21.** Легкий мячик радиусом  $R = 10$  см, прикрепленный к концу нерастяжимой и невесомой нити длиной  $l = 1$  м, вращается с постоянной скоростью  $v = 2$  м/с в горизонтальной плоскости. В центре окружности имеется запас нити, его отпускают, и длина нити скачком увеличивается до  $L = 1,5$  м. Чему станет равен период  $T$  вращения мячика?

**3.22.** Тележка массой 100 кг движется по рельсам со скоростью 20 м/с. На неё сверху вертикально падает мешок массой 50 кг. С какой скоростью станет при этом двигаться тележка?

**3.23.** Снаряд массой 0,35 кг покоится. Взрыв изнутри разрывает его на три осколка: один, массой 100 г, летит вертикально со скоростью 5 м/с, второй, массой 200 г, – со скоростью 2,5 м/с в горизонтальном направлении. Какова скорость третьего осколка?

**3.24.** Два шара сталкиваются абсолютно неупруго. Масса первого шара 8 кг, его скорость 4 м/с; масса второго шара 2 кг, его масса 6 м/с. Чему будет равна скорость шаров после соударения? Шара движутся: а) вдоль одной прямой в одном направлении; б) вдоль одной прямой навстречу друг другу; в) во взаимно перпендикулярных направлениях.

**3.25.** Шарик массой  $m = 10$  г, имеющий скорость  $v = 20$  м/с, налетел на другой, покоящийся шарик массой  $M = 20$  г и после

абсолютно упругого удара отскочил под прямым углом к первоначальному направлению движения. Какую скорость  $u$  приобрёл при этом второй шарик?

**3.26.** Тело массой 250 г начинает движение вдоль прямой под действием силы, меняющейся со временем по закону  $F = 8 - 4t$  (Н). Какую работу успеет совершить эта сила к тому моменту времени, когда она станет равной нулю?

**3.27.** Чему равна работа, которую необходимо совершить с тем, чтобы поднять груз массой 1 кг с поверхности Земли на высоту а) 10 м? б) на высоту, равную радиусу Земли (6350 км)?

**3.28.** Каким должен быть коэффициент трения скольжения между колёсами и рельсами с тем, чтобы при экстренном торможении локомотива, двигавшегося со скоростью 72 км/ч, его тормозной путь не превысил 100 м?

**3.29.** Пружина упруго деформирована под действием некоторой силы. Величину силы уменьшают на 50%. Во сколько раз при этом изменяется потенциальная энергия деформированной пружины?

**3.30.** Однородный цилиндр может вращаться без трения относительно неподвижной горизонтальной оси, совпадающей с его осью симметрии. К цилиндру по касательной к его боковой поверхности и перпендикулярно оси прикладывается сила 15 Н. Вычислите кинетическую энергию цилиндра через 6 с после начала движения. Масса цилиндра 10 кг.

**3.31.** Отправляющийся поезд массой 6000 т за 5 минут развил скорость 90 км/ч. Какова средняя мощность двигателя локомотива?

**3.32.** Электропоезд при выключенном двигателе съезжает с постоянной скоростью 72 км/ч по прямому участку, уклон которого составляет 10 м на 1 км пути. Какую мощность развивает двигатель этого электропоезда во время подъема на этом же уклоне при движении с той же скоростью? Масса электропоезда  $10^3$  т.

**3.33.** Определите среднюю мощность электромотора, способного раскрутить однородную платформу в форме диска массой 0,5 т и радиусом 1 м до частоты 100 об/с за время 1 мин. Потери на трение составляют 5 %.

**3.34.** Шайба, пущенная со скоростью  $v = 10$  м/с, проходит по горизонтали расстояние  $S = 10$  м, а затем поднимается по наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$ . Определите максимальную высоту  $h$ , на которую поднимется шайба, если коэффициент трения на всём пути движения  $\mu = 0,2$ .

**3.35.** Невесомая нерастяжимая нить может скользить без трения по изогнутому жёлобу (рис. 3.8). К концам этой нити прикреплены грузы  $M = 4$  кг и  $m = 2$  кг. Груз  $M$  поднимают настолько, чтобы груз  $m$  коснулся пола, после чего отпускают. Высота  $h = 3$  м. Какова максимальная высота  $H$ , на которую подскочит груз  $m$ ?

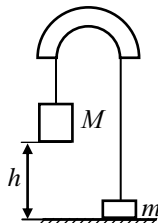


Рис. 3.8

**3.36.** На наклонную плоскость с одинаковой начальной скоростью центра масс без проскальзывания вкатываются тонкий обруч, диск и шар одинаковых радиусов. Определите отношение максимальных высот подъёма указанных тел. Найдите отношение этих высот к максимальной высоте подъёма материальной точки, въезжающей без трения на наклонную плоскость с той же начальной скоростью.

**3.37.** Тонкий обруч радиусом 61,6 см раскрутили до угловой скорости 20 рад/с и положили плашмя на горизонтальную поверхность. Сколько оборотов сделает обруч до полной остановки, если коэффициент трения между ним и поверхностью равен 0,2?

**3.38.** На пружинные весы без начальной скорости кладут груз массой 1 кг. До какого максимального значения отклониться стрелка весов? Шкала весов отградуирована в ньютонах.

**3.39.** С какой минимальной скоростью  $v$  пластилиновый шарик должен налететь на точечное тело массой  $M = 15$  г, подвешенное на невесомом стержне длиной  $l = 5$  см с тем, чтобы после абсолютно неупругого столкновения стержень смог совершить оборот вокруг точки подвеса? Масса шарика  $m = 5$  г, трением на оси вращения стержня пренебречь.

## Тема 4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

**4.1.** Во сколько раз должна была бы увеличиться масса двух электронов с тем, чтобы сила их электростатического отталкивания была скомпенсирована силой гравитационного притяжения?

**4.2.** Расстояние между центрами двух маленьких шариков, имеющих заряды  $+96$  нКл и  $+64$  нКл, равно  $2$  см. С каким ускорением начнёт двигаться электрон, если его поместить в точку, находящуюся посередине между центрами шариков?

**4.3.** Два одинаково заряженных маленьких шарика находятся на расстоянии  $10$  см друг от друга в вакууме и при этом отталкиваются друг от друга с силой  $4,466$  мкН. Какая сила будет действовать со стороны этих шариков на электрон, оказавшийся в точке, удалённой на расстояние  $8$  см от одного шарика и  $6$  см от другого?

**4.4.** Два одинаковых шарика массой по  $1$  г подвешены в одной точке на нитях длиной  $0,4$  м. Один из шариков заряжают и дают ему возможность соприкоснуться с другим, после чего шарики начинают отталкиваться, причём угол между нитями в итоге становится равен  $90^\circ$ . Какой заряд был сообщён первому шарiku?

**4.5.** Три одинаковых маленьких заряженных шарика располагаются в вакууме вдоль одной прямой (см. рис. 4.1). Заряды шариков равны:  $q_1 = +10$  нКл,  $q_2 = +20$  нКл,  $q_3 = -30$  нКл; расстояния:  $AB = 10$  см,  $BC = 20$  см. В какой из точек: X или Y (здесь  $AX = XB$ ;  $BY = YC$ ) напряжённость электрического поля выше?

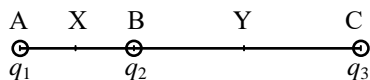


Рис. 4.1

**4.6.** В центре равностороннего треугольника размещён точечный заряд  $q = 10$  нКл. В двух вершинах треугольника располагаются одинаковые точечные заряды  $Q$ , такие, что в третьей вершине общая напряжённость поля всей системы зарядов оказывается равной нулю. Вычислите величину  $Q$ .

**4.7.** В вершинах квадрата со стороной  $10$  см располагают одинаковые по величине заряды: два положительных и два отрицательных. Какова должна быть величина этих зарядов и как их нуж-

но расположить с тем, чтобы напряжённость электрического поля в центре квадрата оказалась равной  $5,1 \text{ В/м}$ ?

**4.8.** Определите напряжённость электрического поля равномерно заряженного прямого отрезка проволоки длиной  $2 \text{ м}$  в точке, находящейся на расстоянии  $75 \text{ см}$  от середины отрезка и равноудалённой от его концов. Линейная плотность заряда проволоки равна  $4,17 \text{ нКл/м}$ .

**4.9.** Алюминиевый шарик (плотность  $2,6 \text{ т/м}^3$ ), имеющий заряд  $+100 \text{ нКл}$ , погружён в сосуд с маслом (плотность  $0,9 \text{ т/м}^3$ ), в котором создано электростатическое поле, силовые линии которого направлены вертикально вверх. Вычислите значение напряжённости этого поля, если известно, что шарик плавает в масле, не погружаясь и не всплывая. Радиус шарика равен  $2,9 \text{ мм}$ .

**4.10.** Электрон, пролетающий над горизонтально расположенной равномерно заряженной плоскостью параллельно этой плоскости, за  $2,5 \text{ нс}$  смещается по вертикали на  $3 \text{ мм}$ . Чему равна поверхностная плотность заряда плоскости?

**4.11.** Известно, что Земля имеет избыточный отрицательный электрический заряд, вследствие чего напряжённость электрического поля у её поверхности оказывается равной примерно  $100 \text{ В/м}$ . Считая Землю шаром, а заряд – равномерно распределённым по всей её поверхности, рассчитайте, сколько в среднем избыточных электронов приходится на каждый квадратный метр её поверхности.

**4.12.** Между двумя равномерно заряженными плоскостями с поверхностной плотностью заряда  $+8,85 \text{ мКл/м}^2$  и  $-17,7 \text{ мКл/м}^2$  на тонкой непроводящей нити подвешен маленький заряженный шарик массой  $153 \text{ г}$  и зарядом  $+1 \text{ мКл}$ . На какой угол от вертикали отклонится нить с шариком?

**4.13.** Точечный заряд  $1 \text{ мКл}$  находится в центре куба. Вычислите, чему равен поток вектора напряжённости электрического поля через поверхность одной грани куба.

**4.14.** В центре большой сферы в вакууме на тонкой непроводящей пружине закреплены два лёгких одинаково заряженных шарика. Шарика отталкиваются; пружина оказывается упруго растяну-

той на  $x = 1$  см (длина нерастянутой пружины равна  $l = 9$  см). Известно, что поток вектора напряженности электрического поля, создаваемого зарядами, через поверхность сферы равен  $\Phi = 25$  В/м. Чему равна жёсткость пружины  $k$ ?

**4.15.** В некоторой точке однородного электрического поля электрон имел скорость 30 км/с. Пройдя вдоль силовой линии 5 мм, он приобрёл скорость 80 км/с. Найти: а) напряженность электрического поля; б) разность потенциалов между точками поля, в которых он имел эти значения скорости.

**4.16.** Зависимость потенциала электростатического поля от координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  (система координат – декартова, прямоугольная) имеет вид:  $\varphi = 4[2x + y^2 + z^3]$  (В). Найти модуль вектора напряжённости электрического поля в точке, имеющей координаты  $x = 2$  м,  $y = 3$  м, и  $z = 1$  м.

**4.17.** Найти потенциал электрического поля, создаваемого в одной из вершин куба с ребром 1 м, если в остальных вершинах расположены заряды по +1 нКл.

**4.18.** Два маленьких шарика с зарядами +20 мкКл и –40 мкКл находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Какую надо совершить работу, чтобы уменьшить это расстояние на 25 %?

**4.19.** При перемещении электрона на  $l = 30$  мм вдоль силовой линии вблизи равномерно заряженной бесконечной плоскости силами электрического поля совершается работа  $A = 100$  эВ. Вычислите значение вектора электрического смещения  $D$  поля, создаваемого плоскостью.

**4.20.** Согласно теории Н.Бора электрон в атоме водорода движется по круговой орбите вокруг протона по орбите радиусом  $0,53 \cdot 10^{-10}$  м. Вычислите, чему равна кинетическая  $W_k$ , потенциальная  $W_{\Pi}$  и полная энергия  $E$  такого электрона. Ответ выразите в электронвольтах.

**4.21.** Шарик массой 40 мг, имеющий заряд +0,1 мкКл, движется со скоростью 1 м/с по направлению к закреплённому точечному заряду +0,2 мкКл. На какое минимальное расстояние шарик сможет приблизиться к этому заряду?

**4.22.** Две бесконечных равномерно заряженных плоскости расположены в пространстве параллельно друг другу. Электрон, обладающий практически нулевой скоростью, испускается первой плоскостью с поверхностной плотностью заряда, равной  $-320 \text{ пКл/м}^2$ , летит по направлению к другой плоскости (поверхностная плотность заряда  $+320 \text{ пКл/м}^2$ ). Достигнув её, он пролетает эту плоскость насквозь через маленькую дырочку, при этом в момент его пролёта скорость оказывается равной  $400 \text{ км/с}$ . Вычислите расстояние между плоскостями.

**4.23.** Электрон в вакууме отрывается от длинной прямой равномерно заряженной нити диаметром  $d = 0,4 \text{ мм}$  с линейной плотностью заряда  $\tau = -20 \text{ пКл/м}$ . Считая начальную скорость электрона равной нулю, вычислите его скорость  $v$  на расстоянии  $R = 2 \text{ см}$  от центра нити.

**4.24.** Маленькие шарики, несущие заряды  $q_1 = 1 \text{ нКл}$ ,  $q_2 = 2 \text{ нКл}$  и  $q_3 = 3 \text{ нКл}$ , расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $a = 1 \text{ м}$ . Расстояние между зарядами уменьшают вдвое. Какую работу при этом совершают внешние силы?

**4.25.** На рисунке изображены возможные варианты (**AB**, **AC**, **CB**, **DE**, **DF**, **FE**, **EB**) переноса точечного заряда  $-q$  в электрическом поле, создаваемом зарядом  $+Q$  (расположенном в центре картинки). В каком из случаев работа, совершаемая силами электрического поля, оказывается: а) минимальной; б) максимальной? Считать, что изменение радиуса при переходе от одной окружности к другой одинаково.

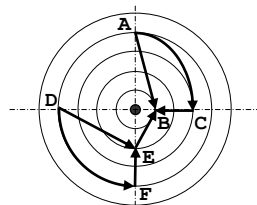


Рис. 4.2

**4.26.** Какую работу необходимо совершить с тем, чтобы молекулу, имеющую дипольный момент  $3,2 \cdot 10^{-29} \text{ Кл} \cdot \text{м}$  и расположенную вдоль силовой линии электрического поля напряженностью  $10^6 \text{ В/м}$ , развернуть в противоположную сторону?



## Тема 5.

## ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

**5.1.** Протон в вакууме влетает в пространство между горизонтально расположенными пластинами плоского конденсатора со скоростью  $32 \cdot 10^3$  км/с. Пластины имеют форму квадратов со стороной 40 см, расположенных на расстоянии 0,8 см друг от друга; начальная скорость протона направлена вдоль двух из сторон квадрата. Разность потенциалов на обкладках конденсатора составляет 133,6 В. На сколько сместится протон в вертикальном направлении под действием электрического поля за время его движения в конденсаторе?

**5.2.** В плоском воздушном конденсаторе с вертикально установленными пластинами на невесомой непроводящей нити подвешен заряженный шарик массой 0,2 г. Электроёмкость конденсатора равна 62,8 пФ, площадь каждой из обкладок  $900 \text{ см}^2$ . На пластины подается напряжение 1000 В, при этом нить с шариком отклоняется от вертикали на угол  $2,3^\circ$ . Чему равен заряд шарика?

**5.3.** Резиновый шарик, поверхность которого покрыта проводящим материалом, заряжают до некоторого заряда и начинают надувать, причём подаваемый насосом в единицу времени объём воздуха поддерживается постоянным. Начертите графики: а) зависимости потенциала шарика от его радиуса; б) зависимости потенциала шарика от времени. Изменением давления газа в шарике в процессе надувания пренебречь.

**5.4.** В центр пространства между двумя параллельными круглыми проводящими пластинами вводят шарик из пластилина диаметром  $d = 24$  мм, после чего пластины начинают сближать, расплющивая шарик. Сближение прекращается, когда пластилин достигает краёв пластин. Чему равна электроёмкость  $C$  получившегося конденсатора? Диаметр пластин  $D = 96$  мм, диэлектрическая проницаемость пластилина равна  $\epsilon = 2,2$ .

**5.5.** Двадцать семь одинаковых заряженных водяных капелек сливаются в одну общую каплю. Во сколько раз потенциал получившейся большой капли отличается от потенциала каждой из маленьких капелек?

**5.6.** Нашу планету в первом приближении можно считать однородным проводящим шаром, обладающим некоторым избыточным отрицательным зарядом. Электроёмкость Земли равна примерно 700 мкФ, напряжённость электрического поля у её поверхности составляет около 100 В/м. Исходя из данных задачи:

- оцените радиус  $R_3$  Земли;
- вычислите, чему равен электрический заряд  $Q_3$  Земли;
- определите, чему равны потенциал  $\phi$  и напряжённость электрического поля Земли в точке, находящейся на глубине 100 м под поверхностью планеты.

**5.7.** Найдите значения электроёмкости систем конденсаторов, представленных на рис. 5.1 – 5.3. Электроёмкость каждого из конденсаторов системы равна 1 мкФ.

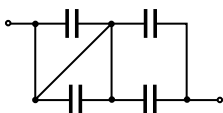


Рис. 5.1

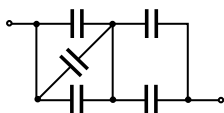


Рис. 5.2

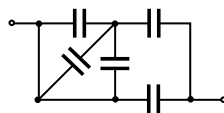


Рис. 5.3

**5.8.** В системах, изображённых на рис. 5.4 – 5.5, конденсаторы – плоские, воздушные, площади их пластин одинаковы. Пластины А и D систем неподвижны, пластины В и С жёстко связаны одна с другой (перемещая одну, мы, тем самым, на такое же расстояние передвигаем и другую).

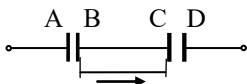


Рис. 5.4.

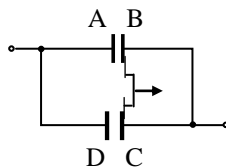


Рис.5.5

В начальный момент времени расстояние АВ между пластинами первого конденсатора вдвое меньше расстояния CD между пластинами второго, затем расстояние АВ увеличивают в полтора раза. Во сколько раз изменится общая электроёмкость системы в каждом из этих случаев?

**5.9.** Разность потенциалов между точками А и В на рис. 5.6 равна 120 В,  $C_1 = 3$  мкФ,  $C_2 = 4$  мкФ,  $C_3 = 2$  мкФ. Чему равно напряжение на конденсаторе  $C_2$ ?

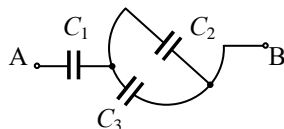


Рис. 5.6

**5.10.** Как нужно соединить два электрических конденсатора: параллельно или последовательно с тем, чтобы, заряжая их от одного источника напряжения, запасти в системе максимальный заряд?

**5.11.** Два конденсатора, электроёмкости которых равны 2 мкФ и 3 мкФ, поочередно зарядили от источника напряжения 30 В, после чего разноимённо заряженные обкладки попарно соединили. Чему при этом окажется равной итоговая разность потенциалов на обкладках?

**5.12.** Конденсатор с электроёмкостью  $C_1 = 4$  мкФ зарядили от источника напряжения  $U = 15$  В, после чего перенесли в другое место и подсоединили к его обкладкам конденсатор с электроёмкостью  $C_2 = 1$  мкФ. Через достаточное время второй конденсатор убрали, а первый вновь унесли на зарядку. Какой добавочный заряд перетечёт из зарядного устройства на конденсатор  $C_1$  в результате дозарядки?

**5.13.** Конденсатор с электроёмкостью  $C_1 = 4$  мкФ зарядили от источника напряжения  $U = 15$  В, после чего перенесли в другое место и подсоединили к его обкладкам конденсатор с электроёмкостью  $C_2 = 1$  мкФ. Через достаточное время второй конденсатор убрали, первый вновь унесли на зарядку, а, зарядив, вернули и к нему вновь подсоединили (не меняя полярности) конденсатор  $C_2$ . Каким в итоге станет заряд  $q$  конденсатора  $C_2$  в результате этих двух подсоединений?

**5.14.** Плоский воздушный конденсатор зарядили от аккумулятора, после чего отсоединили от сети. Затем внутрь конденсатора параллельно его обкладкам (не касаясь их) ввели плоскопараллельную пластину, толщина которой вдвое меньше зазора между обкладками, а ширина и высота достаточны, чтобы полностью перекрыть пространство от одной обкладки до другой. Как изменятся напряжение и заряд на конденсаторе: а) в случае, если

пластина – металлическая; б) если пластина изготовлена из материала с диэлектрической проницаемостью, равной 3?

**5.15.** Плоский воздушный конденсатор зарядили от аккумулятора, после чего, не отсоединяя от сети, внутрь него параллельно обкладкам (не касаясь их) ввели плоско-параллельную пластину, толщина которой вдвое меньше зазора между обкладками, а ширина и высота достаточны, чтобы полностью перекрыть пространство от одной обкладки до другой. Как изменятся напряжение и заряд на конденсаторе: а) в случае, если пластина – металлическая; б) если пластина изготовлена из материала с диэлектрической проницаемостью, равной 3?

**5.16.** Кювету, имеющую форму параллелепипеда, две противоположные вертикальные грани которого сделаны из проводящего материала, а остальные – стеклянные, заполняют керосином. Полагая, что скорость подачи керосина неизменна, начертите график зависимости от времени электроёмкости кюветы.

**5.17.** Два электрических конденсатора поочерёдно зарядили от источника постоянного напряжения, после чего соединили одновременно заряженными обкладками. А) Меняется ли при таком соединении общая энергия системы? Б) Каким окажется результат, если у конденсаторов попарно соединить обкладки с противоположными знаками заряда?

**5.18.** При соединении разноименными обкладками двух конденсаторов с электроёмкостями 10 мкФ и 40 мкФ выделилась энергия 1 Дж. Оба конденсатора до соединения были подзаряжены от одного и того же устройства. Какое напряжение создавало на выходе это устройство?

**5.19.** Пространство между пластинами плоского воздушного конденсатора заполнили маслом с диэлектрической проницаемостью, равной 2, после чего конденсатор зарядили, сообщив ему энергию 5 мкДж. По окончании зарядки конденсатор сначала отсоединили от зарядного устройства, затем слили масло и установили конденсатор на рабочее место. Поработав некоторое время, конденсатор вновь разрядился. Чему равна энергия, выделившаяся при его разрядке?

**5.20.** На рис. 5.7 изображена схема электрической цепи, в которой  $C_1 = 0,8$  мкФ,  $C_2 = 2$  мкФ,  $C_3 = 3$  мкФ,  $E = 100$  В. В начальный момент времени ключ  $K_1$  закрыт, ключ  $K_2$  открыт. Затем ключ  $K_1$  открывают, а ключ  $K_2$  закрывают. Какая энергия выделится в окружающую среду в результате такой операции?

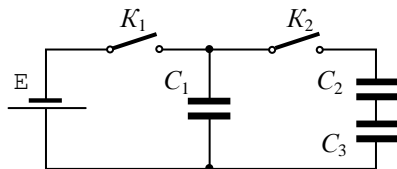


Рис. 5.7.

**5.21.** Для изготовления электрического конденсатора одну и ту же квадратную металлическую пластину можно: а) разрезать на две одинаковые части и использовать их в качестве обкладок, проложив между ними плёнку фторопласта; б) разрезать на четыре одинаковые части, собрать два конденсатора, проложив между ними тот же фторопласт, после чего конденсаторы соединить последовательно, в) те же конденсаторы соединить параллельно. В каком из этих трёх случаев общая электрическая энергия, которую можно будет запасти, если подсоединить систему к аккумулятору, окажется минимальной?

**5.22.** Электрическая энергия, запасённая плоским конденсатором, равна  $W = 1$  мкДж. Для заполнения пространства между обкладками использовано  $m = 10$  г масла (плотность  $\rho = 885$  кг/м<sup>3</sup>, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2$ ). Чему равна напряженность электрического поля  $E$  внутри конденсатора?

**5.23.** На плоский конденсатор подано напряжение 1кВ, в результате чего объёмная плотность энергии электрического поля внутри конденсатора оказалась равной 88,5 мДж/м<sup>3</sup>. Величина вектора электрического смещения поля внутри конденсатора составляет 1,77 мкКл/м<sup>2</sup>. Чему равна ширина зазора между обкладками?

**5.24.** Плоский конденсатор подключили к зарядному устройству и, не отключая от него, стали раздвигать обкладки, увеличивая расстояние между ними в два раза. Во сколько раз при этом меняется объёмная плотность энергии электрического поля внутри конденсатора?

**5.25.** Объёмная плотность энергии электрического поля в пространстве между пластинами конденсатора равна  $23,6 \text{ Дж/м}^3$  при величине вектора электрического смещения  $35,4 \text{ мкКл/м}^2$ . Чему равна поляризованность диэлектрика, заполняющего межэлектродное пространство?

## Тема 6.

## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

**6.1.** Провод длиной 98 м разрезали на несколько одинаковых кусков и сделали из этих кусков один многожильный кабель. Электрическое сопротивление этого кабеля оказалось в 49 раз меньше, чем у исходного провода. Чему равна длина получившегося кабеля?

**6.2.** Из одного и того же количества меди изготовлены куб и цилиндр с диаметром основания, равным высоте. Можно измерить электрическое сопротивление куба  $R_k$  между противоположными гранями и цилиндра  $R_c$  – между основаниями. У какого из образцов оно больше?

**6.3.** Для создания линии электропередачи можно использовать медный провод, а можно – алюминиевый. Какого провода потребуется меньше (электрическое сопротивление в обоих случаях должно быть одинаково)? Удельное сопротивление меди равно  $0,017 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, алюминия –  $0,028 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; плотность меди равна  $8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, алюминия –  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**6.4.** Из медной проволоки с изоляцией на цилиндрическую оправку намотан соленоид из 100 витков; витки расположены вплотную друг к другу. Длина получившегося соленоида – 20 см, площадь поперечного сечения оправки 78,5 мм<sup>2</sup>. Найдите электрическое сопротивление соленоида. Удельное сопротивление меди равно  $0,017 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

**6.5.** Два одинаковых миллиамперметра, включенных в сеть так, как это изображено на рис. 6.1.а, показывают силу тока 45 мА. В цепь добавляют еще один такой же миллиамперметр (рис. 6.1.б). Какими станут показания миллиамперметра 1?

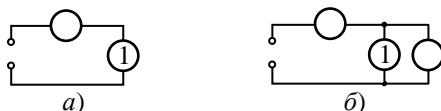


Рис. 6.1

**6.6.** Миллиамперметр 1, включенный в сеть так, как это изображено на рис. 6.2.а, показывает силу тока 45 мА. В цепь добавляют

еще один такой же миллиамперметр (рис. 6.1.б), показания прибора 1 уменьшаются до 30 мА. Какими станут показания миллиамперметра 1, если в цепь включить еще два таких же прибора (рис. 6.2.в)?

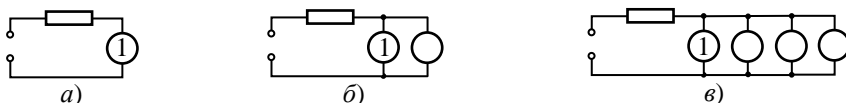


Рис. 6.2

**6.7.** Миллиамперметр может измерять силу тока до 100 мА. К нему подключили шунт и получили возможность измерять ток до 500 мА. Во сколько раз (и в какую сторону) следует изменить сопротивление шунта с тем, чтобы миллиамперметром стало возможным измерять ток до 900 мА?

**6.8.** Параллельно миллиамперметру включён реостат так, как это показано на рис. 6.3; система соединена с источником постоянного напряжения. Начертите график зависимостей: а) силы тока через миллиамперметр а б) общей силы тока в цепи от длины  $L$  дорожки реостата. Построение поясните соответствующими формулами.

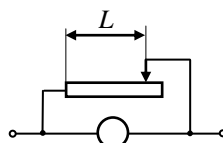


Рис. 6.3

**6.9.** Два одинаковых милливольтметра, подключённых к источнику постоянного напряжения так, как это изображено на рис. 6.4.а, показывают напряжение 45 мВ каждый. В цепь добавляют еще один такой же милливольтметр (рис. 6.4.б). Какими станут показания милливольтметра 1?

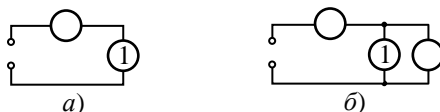


Рис. 6.4

**6.10.** Милливольтметр 1, включенный в сеть так, как это изображено на рис. 6.5.а, показывает напряжение 45 мВ. В цепь добавляют еще один такой же милливольтметр (рис. 6.5.б), показания прибора 1 уменьшаются до 30 мВ. Какими станут показания мил-



ливольметра 1, если в цепь включить еще два таких же прибора (рис. 6.5.в)?

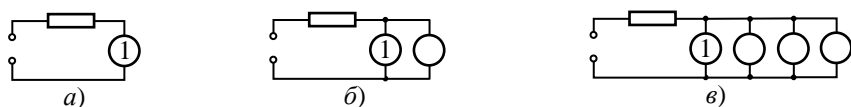


Рис. 6.5

**6.11.** Чему равны показания миллиамперметров в схемах на рис. 6.6? Везде на схемах э.д.с. источников тока  $E = 12$  В, их внутреннее сопротивление по 4 Ом,  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 200$  Ом,  $R_3 = 400$  Ом,  $R_4 = 500$  Ом. Внутреннее сопротивление миллиамперметров считать равным нулю.

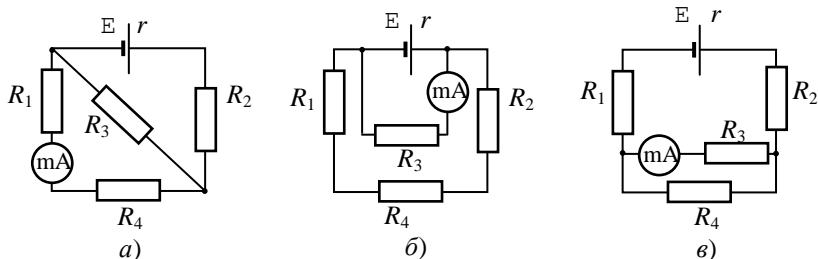


Рис. 6.6

**6.12.** Чему равны показания вольтметров в схемах на рис. 6.7? Везде на схемах э.д.с. источников тока  $E = 36$  В, их внутреннее сопротивление по 10 Ом,  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 200$  Ом,  $R_3 = 400$  Ом,  $R_4 = 500$  Ом. Внутреннее сопротивление вольтметров считать бесконечно большим.

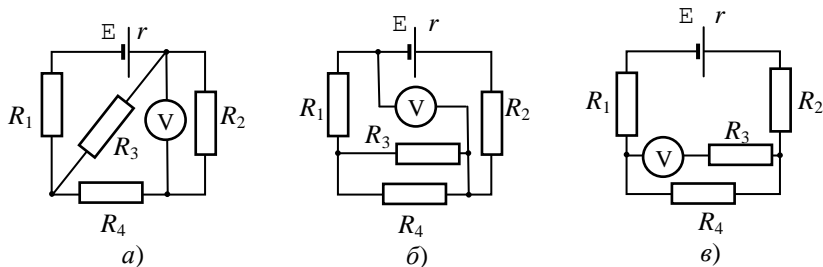


Рис. 6.7

**6.13.** К батарее с э.д.с. 25,4 В подключён резистор. Если в эту цепь включить миллиамперметр с внутренним сопротивлением 51 Ом, он покажет, что в цепи идёт ток 100 мА. Если без миллиамперметра измерить напряжение на резисторе вольтметром с внутренним сопротивлением 3000 Ом, вольтметр покажет напряжение 25 В. Чему равно сопротивление резистора?

**6.14.** При последовательном соединении двух одинаковых источников э.д.с. (рис. 6.8.а) через резистор  $R$  идёт ток 300 мА, а при параллельном (рис. 6.8.б) – ток 240 мА. Какой ток будет идти через резистор, если его подсоединить лишь к одному из источников?

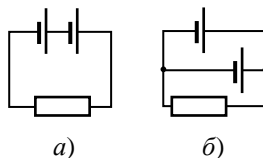


Рис. 6.8

**6.15.** Предельно достижимое значение плотности тока  $j$  для медного проводника сечением  $1 \text{ мм}^2$  составляет около  $10^7 \text{ А/м}^2$  (при более высокой плотности тока проводник начинает плавиться). В объёме  $V = 1 \text{ мм}^3$  меди содержится  $N = 8 \cdot 10^{19}$  электронов. Оцените значение дрейфовой скорости  $v_d$  электронов в этих условиях. Во сколько раз это значение отличается от среднеквадратичной скорости  $v_{\text{кв}}$  теплового движения электронов при температуре плавления меди ( $+1083^\circ\text{C}$ )?

**6.16.** По алюминиевому проводнику (удельное сопротивление  $0,028 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) сечением  $1 \text{ мм}^2$  идёт электрический ток 0,5 А. Чему равна средняя напряженность электрического поля в проводнике?

**6.17.** Сколько электронов проходит каждую секунду через поперечное сечение проводника (площадью  $2 \text{ мм}^2$ ) при плотности тока  $40 \text{ А/см}^2$ ?

**6.18.** Плоский конденсатор, между обкладками которого находится вещество с диэлектрической проницаемостью, равной 3, постепенно разряжается вследствие утечки заряда сквозь диэлектрик. За десять минут теряется половина заряда конденсатора. Вычислите удельное сопротивление вещества, находящегося между обкладками. Рассмотрите два случая: а) скорость разряда конденсатора постоянна и б) скорость разряда пропорциональна величине заряда на обкладках конденсатора.

**6.19.** На концах проводника с сопротивлением  $100\ \text{Ом}$  создаётся разность потенциалов, которая за  $20\ \text{с}$  равномерно увеличивается от нулевого значения до  $60\ \text{В}$ . Какой заряд пройдёт по проводнику за время с четвёртой по пятнадцатую секунду включительно? Какое количество теплоты выделится при этом в проводнике?

**6.20.** Определите напряжение на клеммах двигателя электроваза, находящегося на расстоянии  $7\ \text{км}$  от тяговой подстанции (создающей напряжение  $3,3\ \text{кВ}$ ), если известно, что электрическое сопротивление одного километра провода и рельсов равны  $0,04\ \text{Ом}$  и  $0,025\ \text{Ом}$  соответственно. Двигатель электроваза при напряжении  $3,3\ \text{кВ}$  рассчитан на силу тока  $1\ \text{кА}$ .

**6.21.** Во сколько раз нужно повысить напряжение на выходных шинах тяговой подстанции с тем, чтобы потери электрической энергии в контактной сети (при той же отдаваемой мощности) уменьшились в  $4$  раза?

**6.22.** В момент отправления поезда от станции последовательно с двигательной секцией электроваза (секция состоит из трёх параллельных групп попарно соединённых двигателей, см. рис. 6.9) с помощью реостата вводится добавочное электрическое сопротивление  $R$ . Каким должно быть это сопротивление с тем, чтобы напряжение на каждом из двигателей не превысило максимально допустимого значения  $U = 1\ \text{кВ}$ ? Напряжение в контактной сети равно  $U_0 = 3,3\ \text{кВ}$ ; сопротивление обмотки каждого двигателя равно  $R_0 = 2,6\ \text{Ом}$ .

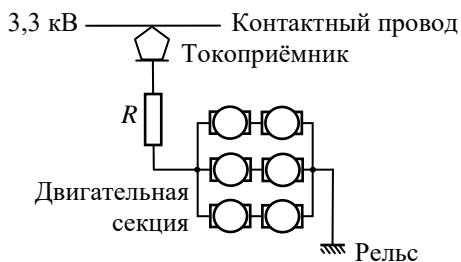


Рис. 6.9

Каким должно быть это сопротивление с тем, чтобы напряжение на каждом из двигателей не превысило максимально допустимого значения  $U = 1\ \text{кВ}$ ? Напряжение в контактной сети равно  $U_0 = 3,3\ \text{кВ}$ ; сопротивление обмотки каждого двигателя равно  $R_0 = 2,6\ \text{Ом}$ .

**6.23.** Начертите график зависимости мощности  $P$ , которую может получить потребитель от аккумулятора с заданными значениями внутреннего сопротивления  $r$  и э.д.с., в зависимости от электрического сопротивления нагрузки  $R$  (электрическим сопротивлением подводящих проводов пренебречь). Найдите значения  $R$ , соответствующие особым точкам графика.

**6.24.** Имеется аккумулятор с заданными значениями э.д.с. и внутреннего сопротивления, к которому подключают нагрузку с переменным сопротивлением  $R$ . Подбирая величину  $R$ , добиваются того, чтобы выделяемая на нагрузке мощность оказалась максимальной. Каким при этом окажется к.п.д. аккумулятора? Электрическим сопротивлением подводящих проводов пренебречь.

**6.25.** Начертите график к.п.д. батареи с заданными значениями внутреннего сопротивления и э.д.с. в зависимости от сопротивления полезной нагрузки.

## Тема 7.

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**7.1.** При каком значении силы тока в проводе контактной сети на расстоянии 10 м от этого провода индукция создаваемого им магнитного поля превысит а) среднее значение индукции магнитного поля Земли (0,06 мТл); б) рекомендованный Международным агентством по исследованию рака безопасный уровень 200 мТл (для полей частотой 50 Гц)?

**7.2.** Четыре тонких прямых проводника, покрытых электроизоляционным лаком, располагаются в одной плоскости параллельно и перпендикулярно друг другу так, как это показано на рис. 7.1.а – г. Точка О находится на одинаковом расстоянии 50 см от каждого из проводников. Чему равна индукция магнитного поля в этой точке? Известно, что  $I_1 = 0,5$  А,  $I_2 = 0,8$  А,  $I_3 = 1,0$  А,  $I_4 = 1,2$  А.

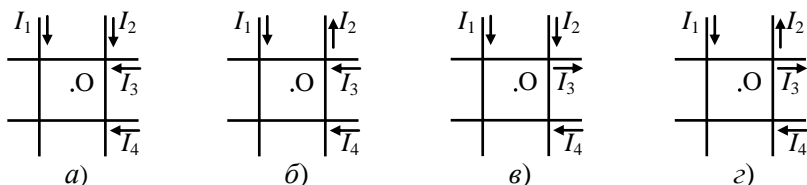


Рис. 7.1

**7.3.** Три тонких бесконечно длинных проводника расположены параллельно друг другу, проходя через три из четырёх вершин квадрата перпендикулярно его плоскости (рис. 7.2.а – г). Стороны квадрата – по 0,4 м; по проводникам идут токи 0,5 А. Во сколько раз отличаются значения индукции магнитного поля в четвёртой вершине от индукции в центре квадрата?

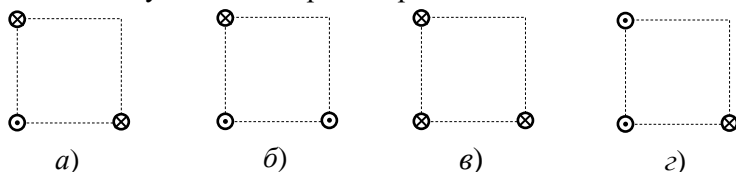


Рис. 7.2

**7.4.** Проводящее кольцо изготовлено из проволоки диаметром  $d = 1$  мм с удельным сопротивлением  $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; общее сопротивление проволоки  $R = 0,1$  Ом. В разрыв кольца включён

источник э.д.с.  $E = 4$  В с внутренним сопротивлением  $r = 1,04$  Ом; по кольцу идёт ток. Чему равна индукция магнитного поля  $B$  в центре кольца?

**7.5.** Тонкий провод длиной 8 м разрезан на две одинаковые части, которые согнуты так, чтобы получились две проволочные окружности. Окружности расположили перпендикулярно друг другу (рис. 7.3) и пустили по ним одинаковые токи силой 0,1 А. Чему равна индукция магнитного поля в центре системы окружностей?

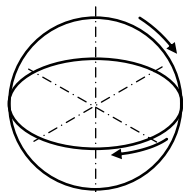


Рис. 7.3.

**7.6.** Тонкий провод длиной 8 м разрезан на две одинаковые части, которые согнуты так, чтобы получились два проволочных квадрата. Квадраты расположили перпендикулярно друг другу (рис. 7.4) и пустили по ним одинаковые токи силой 0,1 А. Чему равна индукция магнитного поля в центре системы квадратов?

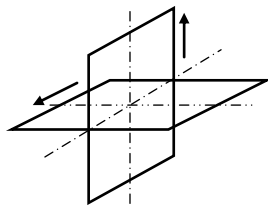


Рис. 7.4.

**7.7.** Точка находится на расстоянии  $a$  от прямого проводника, по которому идёт ток  $I$ . Постройте график зависимости индукции  $B$  магнитного поля в этой точке от длины  $l$  проводника при условии, что точка всё время остаётся равноудалённой от его концов.

**7.8.** Бесконечный тонкий прямой провод в одном месте образует круговую петлю радиусом 1 м (рис. 7.5). По проводу идёт ток силой 0,5 А. Чему равна индукция  $B$  магнитного поля в центре петли?

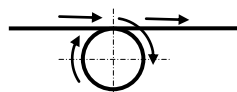


Рис. 7.5

**7.9.** Два горизонтальных параллельных прямых медных (плотность меди  $8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) провода сечением 1 мм<sup>2</sup> расположены один над другим на расстоянии 2 см друг от друга. По проводникам идут постоянные токи, одинаковые по величине, но противоположные по направлению. Какова должна быть величина силы тока в проводниках с тем, чтобы верхний проводник висел в воздухе над нижним, не падая? Устойчивым или неустойчивым будет такое состояние?

**7.10.** Два контактных провода железной дороги подвешены параллельно на расстоянии 5 м друг от друга. По проводам идёт постоянный ток 3 кА и 2 кА. Вычислите силу магнитного взаимодействия проводов в расчёте на каждые 10 м их длины.

**7.11.** По длинному соленоиду, содержащему  $N = 20$  витков на каждые  $l = 1$  см, идёт ток силой  $I = 0,1$  А. Чему равно давление  $p$ , действующее на боковые стенки соленоида?

**7.12.** Под горизонтально расположенной токопроводящей шиной на двух одинаковых пружинах параллельно шине на расстоянии 0,5 м от неё подвешен провод длиной 50 м. Если по проводу и по шине пропустить ток силой 0,3 кА в одном и том же направлении, расстояние между шиной и проводом становится равным 0,49 м. Чему равен коэффициент жёсткости каждой из пружин?

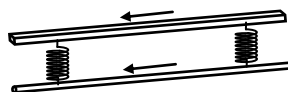


Рис. 7.6

**7.13.** По квадратному проводящему контуру со стороной 50 см идёт ток силой 1 А. Параллельно одной из сторон на расстоянии 50 см от неё в плоскости контура проходит прямой тонкий проводник, по которому идёт ток 2 А (рис. 7.7). Чему равна сила, действующая на контур?

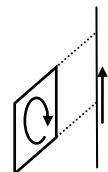


Рис. 7.7

**7.14.** По тонкому бесконечно длинному проводнику идёт ток  $I_1$ . Перпендикулярно этому проводнику на расстоянии  $l$  от него расположен другой, имеющий длину  $2l$  (расстояния от концов второго проводника до первого проводника одинаковы: рис. 7.8); по нему идёт ток  $I_2$ . Чему равна сила, которая действует со стороны короткого проводника на длинный? Как будет вести себя короткий проводник, если его отпустить?

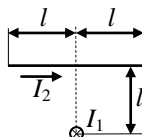


Рис. 7.8

**7.15.** Батарея с ЭДС 7 В и внутренним сопротивлением 5 Ом соединена с параллельными проводящими рельсами, по которым может скользить без трения металлический стержень длиной 0,5 м. Система

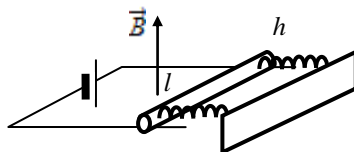


Рис. 7.9

находится в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, линии индукции перпендикулярны стержню и рельсам (рис. 7.9). С одной стороны стержень удерживается двумя одинаковыми пружинами, которые оказываются растянутыми на величину  $h = 20$  мм каждая. Чему равна суммарная энергия упругой деформации пружин? Электрическое сопротивление стержня 30 Ом.

**7.16.** Тонкий провод длиной 8 м разрезали на две одинаковые части, которые изогнули так, чтобы получились две проволочные окружности (рис. 7.3), и пустили по ним одинаковые токи силой 0,1 А. Чему равен общий магнитный момент такой системы?

**7.17.** Из куска проволоки длиной 1 м можно сделать квадратный виток, а можно – круговой. Во сколько раз будут отличаться значения магнитных моментов таких витков, если по ним пустить одинаковые токи?

**7.18.** Катушка, на которую виток к витку намотан медный провод, помещена в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл так, что её ось составляет с линиями индукции угол  $60^\circ$ . Высота катушки 5 мм, её диаметр 2 см; толщина провода 0,25 мм. По катушке идёт ток 0,1 А. Вычислите момент сил, который действует на катушку в магнитном поле.

**7.19.** Известно, что на круговой виток с током в однородном магнитном поле действует момент силы  $M$  (при этом плоскость витка параллельна линиям индукции). Не меняя силу тока в проводнике и ориентации витка в пространстве, его деформируют, делая из него «восьмёрку» с одинаковыми круглыми частями (рис. 7.10). Чему станет равным момент сил, действующих на «восьмёрку»?

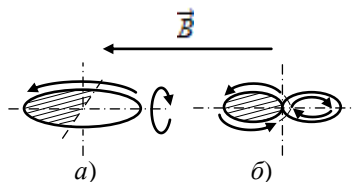


Рис. 7.10

**7.20.** Вычислите индукцию магнитного поля, в котором протон движется по окружности диаметром 1,82 м со скоростью  $2,4 \cdot 10^6$  м/с.

**7.21.** В магнитном поле с индукцией 0,144 Тл электрон, имеющий кинетическую энергию 45,5 кэВ, движется по окружности. Определите радиус этой окружности.



**7.22.** Радиус окружности, описываемой протоном в однородном магнитном поле с индукцией 0,334 Тл, составляет 1 см. Чему равна ускоряющая разность потенциалов, которую прошёл протон, перед тем как попасть в магнитное поле?

**7.23.** Сила, с которой однородное магнитное поле действует на электрон, движущийся по окружности радиуса 2,35 см в вакууме, равна  $3,95 \cdot 10^{-15}$  Н. Вычислите, чему равны: а) скорость электрона; б) напряжённость магнитного поля.

**7.24.** Траекторией движения электрона в однородном магнитном поле является винтовая линия с шагом 20 см и радиусом 5 см. Индукция магнитного поля 100 мкТл. Определите скорость движения электрона.

**7.25.** Электрон влетает в магнитное поле с индукцией 0,0182 Тл со скоростью  $8,0 \cdot 10^6$  м/с. Вектор скорости направлен под углом  $30^\circ$  к линиям индукции. Вычислите радиус и шаг винтовой траектории, по которой движется электрон в магнитном поле.

**7.26.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл частица с зарядом  $q = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл и энергией покоя  $W = 940$  МэВ движется по окружности. Чему равен период  $T$  обращения частицы?

**7.27.** Спутник движется вокруг астероида с первой космической скоростью для этого небесного тела. Рассчитайте величину индукции однородного магнитного поля, которое могло бы обеспечить движение по такой же траектории и с такой же скоростью элементарной частицы – протона. Отношение заряда протона к его массе принять равным  $0,96 \cdot 10^8$  Кл/кг, гравитационная постоянная равна  $6,67 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>; астероид считать однородным шаром плотностью 7015 кг/м<sup>3</sup>.

**7.28.** Непосредственно перед вылетом из циклотрона альфа-частица (ядро атома гелия) двигалась в магнитном поле индукцией 0,5 Тл по круговой орбите радиусом 1 м. После вылета из циклотрона она тормозится электрическим полем. Какую разность потенциалов следует создать с тем, чтобы полностью затормозить эту частицу? Масса альфа-частицы равна  $6,7 \cdot 10^{-27}$  кг.

**7.29.** В кинескопе телевизора для вертикального отклонения

электронного пучка в области протяжённостью  $l = 20$  мм создаётся однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,004$  Тл. Электроны, вылетевшие из катода, движутся перпендикулярно линиям индукции, пройдя перед этим ускоряющую разность потенциалов  $U = 10$  кВ. На какое расстояние  $x$  от начального направления распространения сместится электронный луч в магнитном поле?

**7.30.** Круговой (радиусом 10 см) проволочный виток, по которому идёт ток силой 100 мА, находится в однородном магнитном поле, с индукцией 0,5 Тл. Не меняя ориентации витка в пространстве, его деформируют, превращая из круглого в квадратный. Какая при этом совершается работа?

**7.31.** По прямому тонкому проводнику длиной 0,4 м идёт электрический ток  $I = 0,1$  А. Проводник находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл и расположен перпендикулярно линиям индукции (рис. 7.11). В магнитном поле проводник поворачивают на  $90^\circ$  относительно оси, проходящей перпендикулярно проводнику через его центр. Какая при этом совершается работа? Рассмотрите случаи а) и б).

**7.32.** При повороте круговой рамки с током в однородном магнитном поле на  $30^\circ$  относительно оси, совпадающей с диаметром рамки и перпендикулярной линиям индукции, совершается работа в 1 Дж. Какая работа была бы совершена, если бы рамку повернули вокруг этой же оси не на  $30^\circ$ , а на  $60^\circ$ ? В начальный момент времени плоскость рамки была перпендикулярна линиям индукции.

**7.33.** На горизонтальной поверхности в однородном магнитном поле 0,23 Тл, линии индукции которого параллельны этой поверх-

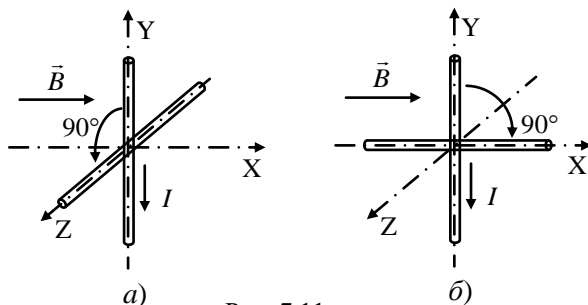


Рис. 7.11

ности, лежит тонкий проводящий однородный стержень длиной 0,5 м и массой 100 г, который является элементом электрической цепи (по нему идёт постоянный ток 1 А). Стержень устанавливают вертикально, медленно поднимая за один конец в плоскости, перпендикулярной линиям индукции (второй конец неподвижен). Какая при этом совершается работа?

## Тема 8.

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**8.1.** Четыре однородных и изотропных цилиндра, изготовленных из диамагнитных и парамагнитных материалов, помещены в магнитное поле напряжённостью  $1000 \text{ кА/м}$  так, что их оси параллельны линиям магнитной индукции этого поля. При этом оказалось, что внутри первого цилиндра индукция  $B_1 = 1,2570 \text{ Тл}$ , внутри второго  $B_2 = 1,2568 \text{ Тл}$ , в третьем образце  $B_3 = 1,2566 \text{ Тл}$ , в четвёртом  $B_4 = 1,2567 \text{ Тл}$ . Какие из цилиндров изготовлены из диамагнетиков, а какие – из парамагнетиков?

**8.2.** Магнитные проницаемости платины и меди равны, соответственно,  $1,00026$  и  $0,99999$ . Найдите отношение магнитных восприимчивостей этих веществ. К каким классам магнетиков относятся медь и платина?

**8.3.** На рис. 8.1 изображён график зависимости индукции магнитного поля от напряжённости этого поля для стали некоторой марки. А) Чему равна магнитная проницаемость этой стали при напряженности  $4000 \text{ А/м}$ ? Б) При какой напряжённости магнитная проницаемость имеет максимальное значение?

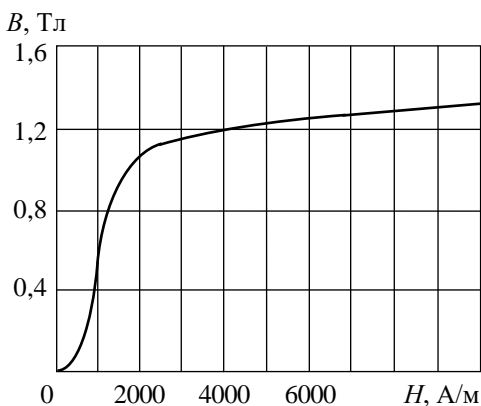


Рис. 8.1

**8.4.** В некоторой диамагнитной среде при напряжённости магнитного поля  $954940 \text{ А/м}$  значение индукции магнитного поля равно  $1,2 \text{ Тл}$ . Чему при этом равна намагниченность среды?

**8.5.** Известно, что при напряжённости магнитного поля  $90 \text{ кА/м}$  сумма магнитных моментов единицы объёма парамагнетика равна  $23,4 \text{ А/м}$ . Чему при этом равна индукция магнитного поля в этом парамагнетике?

**8.6.** Используя рис. 8.1, начертите график зависимости намаг-

ниченности стали той же марки от напряжённости магнитного поля.

**8.7.** На рис. 8.2. представлен график петли гистерезиса для стали некоторой марки. А) Во сколько раз отличается индукция магнитного поля при напряжённости  $1,25 \text{ кА/м}$  от значения остаточной индукции для данного материала? Б) Во сколько раз отличается значение напряжённости магнитного поля, соответствующего индукции  $1,2 \text{ Тл}$ , от коэрцитивной силы для данного материала? В) При каких значениях напряжённости значение магнитной индукции будет равно значению остаточной индукции? Г) Чему равна намагниченность материала при напряжённости магнитного поля  $4 \text{ кА/м}$ ?

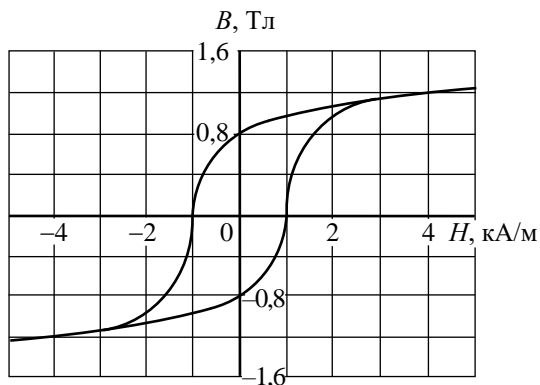


Рис. 8.2

**8.8.** Оловянный цилиндр, находящийся при низкой температуре в сверхпроводящем состоянии, помещают в достаточно слабое магнитное поле напряжённостью  $1 \text{ А/м}$  так, что его ось параллельна линиям магнитной индукции этого поля. Чему в таких условиях будут равны: а) магнитная проницаемость  $\mu$  олова; б) намагниченность  $J$  образца; в) индукция магнитного поля  $B$  внутри цилиндра?

**8.9.** Обмотки главного полюса магнита тягового двигателя электроваз создают магнитное поле напряжённостью  $4 \text{ кА/м}$ . Полагая, что сердечник электромагнита изготовлен из стали, зависимость  $B(H)$  для которой изображена на рис. 8.1, и при этом имеет сечение  $310 \times 200 \text{ мм}^2$ , вычислите, чему равен магнитный поток, проходя-

щий через сердечник.

**8.10.** Катушка диаметром 10 см, на которую намотано 400 витков проволоки, расположена в магнитном поле так, что её ось составляет с линиями индукции угол  $30^\circ$ . Чему будет равно среднее значение э.д.с. индукции в этой катушке при увеличении индукции магнитного поля в течение 0,3 с от 0 до 0,21 Тл?

**8.11.** Якорь генератора переменного тока, содержащий 315 проволочных витков, площадью  $0,05 \text{ м}^2$  каждый, равномерно вращается в однородном магнитном поле (рис. 8.3.) индукцией 16 мкТл, делая 12 оборотов в секунду. Ось вращения перпендикулярна линиям индукции поля. Чему равна максимальная э.д.с., снимаемая с якоря?

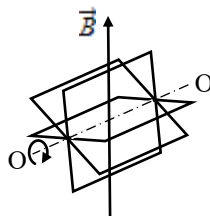


Рис. 8.3

**8.12.** Тонкий металлический стержень длиной 30 см вращается с частотой 100 Гц в плоскости так, как это показано на рис. 8.4. Линии индукции однородного магнитного поля параллельны оси вращения  $OO'$ ;  $B = 0,2 \text{ Тл}$ . Найти э.д.с. индукции, возникающей на концах такого стержня: а) при  $l = 30 \text{ см}$ ; б) при  $l = 15 \text{ см}$ ; в) при  $l = 45 \text{ см}$ .

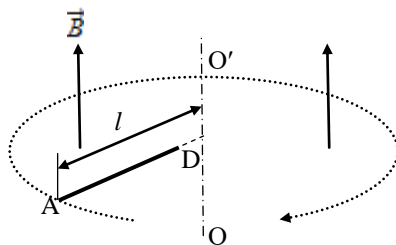


Рис. 8.4

**8.13.** Для измерения скорости поезда параллельно идущие рельсы железнодорожного полотна соединили друг с другом через микроамперметр с сопротивлением 100 Ом. При приближении поезда прибор зафиксировал протекание тока силой 7,6 мкА. Учитывая, что величина вертикальной составляющей магнитного поля Земли в районе Москвы составляет примерно 30 мкТл, вычислите скорость поезда. Ширина железнодорожной колеи равна 1520 мм.

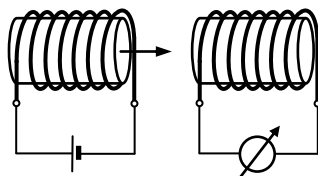


Рис. 8.5

**8.14.** На рис. 8.5 изображены две

катушки: одна из них подключена к источнику постоянного тока, а другая замкнута на микроамперметр. Определите направление индукционного тока, возникающего во второй катушке при приближении к ней первой.

**8.15.** К прямому тонкому проводнику с током подносят проволоочную рамку (рис. 8.6). Определите направление индукционного тока в рамке.

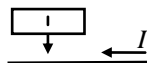


Рис. 8.6

**8.16.** Проволоочная рамка, изготовленная в виде равностороннего треугольника со стороной 20 см, находится в магнитном поле, линии индукции которого входят в плоскость рамки под углом  $60^\circ$  к её поверхности, при этом индукция магнитного поля меняется со временем  $t$  по закону  $B = 0,05t$  (Тл). Чему равна э.д.с. индукции, возникающая в рамке?

**8.17.** Проводящий контур, изготовленный в виде окружности из медной проволоки (удельное сопротивление  $\rho_1 = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, плотность  $\rho_2 = 8600$  кг/м<sup>3</sup>), помещён в магнитное поле напряженностью  $H = 1,36$  кА/м перпендикулярно линиям индукции. Генератор, создающий магнитное поле, отключают; исчезновение поля сопровождается прохождением по проводнику заряда  $q = 17,8$  мКл. Чему равна масса  $m$  проволоки?

**8.18.** По соленоиду (не имеющего сердечника) с индуктивностью 0,2 Гн идёт постоянный электрический ток силой 0,5 А. При отключении источника питания сила тока в обмотке падает до нуля за 0,1 с. Определите среднее значение э.д.с. самоиндукции, возникающей в соленоиде.

**8.19.** По соленоиду (не имеющего сердечника) с индуктивностью 0,2 Гн и электрическим сопротивлением 1 Ом идёт постоянный электрический ток силой 0,5 А. Определите: а) силу тока в соленоиде через 0,1 с после отключения источника питания; б) среднее значение э.д.с. самоиндукции, возникающей в соленоиде за это время.

**8.20.** Тонкий тороидаальный соленоид длиной 10 см намотан «виток к витку» из проволоки диаметром 0,5 мм, при этом площадь поперечного сечения соленоида равна 9 см<sup>2</sup>. По соленоиду идёт ток силой 1 А. Чему равна индуктивность соленоида: а) в отсут-

ствие сердечника; б) в случае, если соленоид навит на стальной сердечник, зависимость  $B(H)$  для которого представлена на рис. 8.1?

**8.21.** Обмотка тонкого тороида, не содержащего сердечника, состоит из проволоки с поперечным сечением  $0,1 \text{ мм}^2$ . Диаметр тороида  $8 \text{ мм}$ , электрическое сопротивление  $1 \text{ Ом}$ . Чему равна его индуктивность? Удельное сопротивление материала проволоки равно  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**8.22.** По участку электрической цепи – см. рис. 8.7, содержащему две последовательно включённых катушки (без сердечников) с индуктивностями  $0,1 \text{ Гн}$  и  $0,2 \text{ Гн}$  и сопротивлениями  $31,4 \text{ Ом}$  и  $62,8 \text{ Ом}$  соответственно, идёт электрический ток, меняющийся со временем по закону  $I = 0,1 \sin(100\pi t) \text{ А}$ . По какому закону меняется со временем разность потенциалов между точками  $A$  и  $D$ ? В расчётах принять  $\pi \approx 3,14$ .

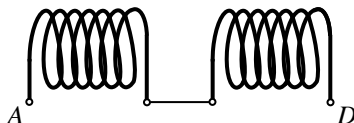


Рис. 8.7

**8.23.** Тороид, электрическое сопротивление которого равно  $R = 2 \text{ Ом}$ , подключают к аккумулятору с э.д.с.  $\mathcal{E} = 8 \text{ В}$ , внутреннее сопротивление которого много меньше сопротивления тороида. Спустя  $t = 10 \text{ мс}$  после подключения сила тока в цепи достигла значения  $I = 1 \text{ А}$ . Чему равна индуктивность  $L$  тороида?

**8.24.** По обмотке соленоида, содержащей  $500$  витков, идёт электрический ток силой  $1 \text{ А}$ , при этом магнитный поток через поперечное сечение соленоида оказывается равен  $0,25 \text{ мВб}$ . Чему равна энергия магнитного поля соленоида?

**8.25.** Объёмная плотность энергии магнитного поля в тороиде, плотно навитом в один слой из провода диаметром  $0,2 \text{ мм}$  на оправку без сердечника, равна  $56,6 \text{ мДж/м}^3$ . Чему равна сила тока в обмотке тороида?

**8.26.** Электрическая цепь состоит из батареи и соленоида (не содержащего сердечника), электрическое сопротивление которого в  $4$  раза больше внутреннего сопротивления батареи. Цепь разомкнули, соленоид разрезали пополам, после чего к той же батарее



подключили одну из половинок. Чему равно отношение значений энергии магнитного поля целого соленоида и его половины?

**8.27.** По тонкому соленоиду длиной 31,4 см, содержащему 300 витков провода, идёт электрический ток 2,5 А. В соленоид вставляют стальной сердечник, и энергия магнитного поля соленоида возрастает после этого в 300 раз. Вычислите значение индукции магнитного поля в центре соленоида с сердечником.

**8.28.** Батарея с э.д.с. 6 В и внутренним сопротивлением 20 Ом через сопротивление 100 Ом ключом  $K$  соединяется с конденсатором, имеющим электроёмкость 1 мкФ так, как это показано на рис. 8.8. Спустя некоторое время ключ  $K$  перебрасывается из положения 1 в положение 2. Найдите максимальное значение силы тока в катушке индуктивности ( $L = 10$  мГн).

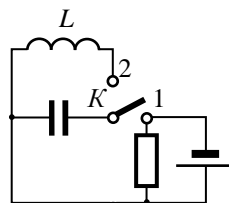


Рис. 8.8

**8.29.** Известно: для того, чтобы на резисторах  $R$  схемы, приведённой на рис. 8.9, выделилось количество теплоты, равное энергии магнитного поля катушки индуктивности ( $L = 24$  мГн), требуется 1 мс. Известно также, что при увеличении  $R$  в четыре раза сила постоянного тока в цепи уменьшается в три раза. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

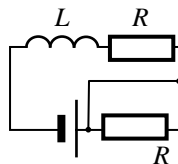


Рис. 8.9

**8.30.** Две катушки, не содержащие сердечников, расположены поблизости друг от друга. При равномерном спаде силы тока в первой катушке за 2 с от 1,0 А до 0,6 А во второй возникает э.д.с. индукции 4 В. Какая э.д.с. индукции возникнет в первой катушке, если сила тока во второй равномерно возрастёт за 4 с от 0,5 А до 1,0 А?

**8.31.** Индукция однородного магнитного поля равномерно возрастает от 0,1 Тл до 0,8 Тл в течение 2 с. Перпендикулярно линиям индукции расположен круговой виток радиусом 20 см. Вычислите напряженность вихревого электрического поля, создаваемого в витке меняющимся магнитным полем.

## Тема 9.

## СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

**9.1.** Амплитуда гармонических колебаний точки около положения равновесия равна 51 см, период равен 2 с. Постройте графики зависимости от времени координаты, скорости и ускорения точки. В начальный момент времени фаза колебания равнялась  $\pi/3$ , причём точка двигалась в сторону максимального значения координаты.

**9.2.** Координата материальной точки массой 10 г меняется по закону  $x = 0,05\sin(2\pi t + \pi/3)$  м. Постройте графики зависимости от времени для силы, действующей на точку, и для её импульса.

**9.3.** Через какое время после прохождения колеблющейся точкой положения равновесия её скорость второй раз станет равной половине своего амплитудного значения (и при этом будет иметь то же, что и в первый раз, направление)? Период колебаний равен 4 с.

**9.4.** Полная энергия тела, совершающего гармонические колебания, равна 0,3 Дж, максимальная сила, действующая на точку, равна 1 Н, период колебаний составляет 4 с. Запишите уравнение колебаний. В начальный момент времени смещение точки от положения равновесия принять равным нулю.

**9.5.** Материальная точка массой 10 г колеблется на пружине по закону  $x = 0,05\sin(2\pi t + \pi/3)$  м. Постройте графики зависимости от времени кинетической, потенциальной и полной механической энергии  $E_{\text{полн}}$  точки.

**9.6.** Материальная точка совершает гармонические колебания с частотой 50 Гц. Запишите уравнение, по которому меняется ускорение  $a$  точки, если известно, что максимальная скорость точки составляет 20 мм/с. В начальный момент времени точка находилась на максимальном удалении от положения равновесия.

**9.7.** Частица массой 10 г совершает гармонические колебания с частотой 0,5 Гц, при этом полная энергия колеблющейся частицы равна 0,1 мДж. Найти зависимость от времени силы  $F$ , действующей на частицу. За начало отсчёта принять время, когда частица была отклонена от положения равновесия на максимальное расстояние.

**9.8.** Скорость материальной точки, движущейся вдоль некоторой оси, меняется по закону  $v = 36\sin(\pi t + \pi/4)$  см/с. Постройте график зависимости от времени для координаты точки.

**9.9.** Ускорение материальной точки, движущейся вдоль некоторой оси, меняется по закону  $a = 0,5\sin(\pi t + \pi/2)$  м/с<sup>2</sup>. Постройте график зависимости от времени для координаты точки.

**9.10.** Сила, действующая на материальную точку массой 10 г, которая движется вдоль некоторой оси, меняется со временем по закону  $F = 20\sin(3\pi t + 3\pi/4)$  Н. Постройте график зависимости от времени для импульса точки.

**9.11.** Кинетическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания, меняется со временем по закону  $W_k = 10\sin^2(4\pi t + 5\pi/6)$  Дж. По какому закону меняется её потенциальная энергия? Постройте соответствующие графики.

**9.12.** На гвозде, вбитом в стену, подвешен обруч радиусом 0,5 м, который совершает малые колебания под действием силы тяжести. Колебания происходят в плоскости обруча. Чему равна частота колебаний? Трением пренебречь.

**9.13.** Период колебаний математического маятника длиной  $l_1$  равен  $T_1 = 3$  с;  $T_2 = 4$  с – период колебаний маятника длиной  $l_2$ . Чему равен период малых колебаний маятника длиной  $l_1 + l_2$ ?

**9.14.** Период малых колебаний шарика массой  $m_1$  на пружинке равен  $T_1 = 1$  с;  $T_2 = 0,8$  с – период колебаний на той же пружинке шарика массой  $m_2$ . Чему равен период малых колебаний на этой же пружинке шарика массой  $m_1 - m_2$ ?

**9.15.** Период малых колебаний под действием силы тяжести жёсткого стержня массой  $m_1$  вокруг горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец, равен  $T_1 = 3$  с. Нижнюю половину стержня отрезают. Чему будет равен период малых колебаний оставшейся части?

**9.16.** Математический маятник у поверхности Земли совершает колебания с частотой 2 Гц. На какой высоте над Землёй период его колебаний станет равным 0,51 с?

**9.17.** Математический маятник у поверхности Земли совершает колебания с частотой 2 Гц. На какую глубину в шахту нужно опустить маятник, чтобы период его колебаний увеличился на 0,1 мс?

**9.18.** Колебательный контур имеет индуктивность 1,6 мГн, электроёмкость 0,04 мкФ и максимальное напряжение на обкладках конденсатора, равное 200 В. Запишите формулу зависимости от времени для силы тока  $I$  в контуре. Сопротивлением проводов пренебречь.

**9.19.** Колебательный контур содержит конденсатор с электроёмкостью 200 мкФ и катушку с индуктивностью 5 мГн. Максимальная сила тока в катушке 40 мА. Получите формулу, описывающую зависимость напряжения  $U$  на конденсаторе от времени. Сопротивлением проводов пренебречь.

**9.20.** Амплитуда колебаний системы, совершающей 100 колебаний за 10 с, уменьшается за это время в  $e$  раз. Чему равны: а) коэффициент затухания колебаний; б) логарифмический декремент затухания; в) добротность системы; г) относительная убыль энергии системы за период колебаний?

**9.21.** Логарифмический декремент затухания маятника равен 0,5. Во сколько раз уменьшается отклонение от положения равновесия маятника за четыре полных колебания?

**9.22.** Сколько полных колебаний  $N$  напряжения на конденсаторе в колебательном контуре успевает пройти, прежде чем их амплитуда уменьшится в  $e$  раз? Контур содержит последовательно включённые конденсатор с электроёмкостью  $C = 0,5$  мкФ, катушку индуктивности  $L = 0,01$  Гн и резистор с сопротивлением  $R = 40$  Ом.

**9.23.** Амплитуда колебаний системы уменьшается в 30 раз за 10 минут. За какое время она уменьшится в 20 раз?

**9.24.** Математический маятник длиной 5,05 м имеет логарифмический декремент затухания 3. Определите коэффициент затухания системы.

**9.25.** Чему равен логарифмический декремент затухания  $\theta$  математического маятника, если за  $t = 3$  мин амплитуда его колебаний уменьшается в  $\Delta = 4$  раза? Длина маятника равна  $l = 9,81$  м.

**9.26.** Обруч радиусом 0,5 м, повешенный на вбитый в стену гвоздь и выведенный из положения равновесия, отклонился при первом колебании на 6 градусов, а при втором на 4 градуса (колебания происходят в плоскости обруча). Определите коэффициент затухания  $\beta$ , логарифмический декремент затухания  $\theta$  и число полных колебаний  $N_e$ , за время которых их амплитуда уменьшается не менее чем в  $e$  раз.

**9.27.** Математический маятник длиной 10 м, выведенный из положения равновесия, отклонился при первом колебании на 10 см, а при втором (в том же направлении) – на 1 см. Определите коэффициент затухания колебаний.

**9.28.** Математический маятник длиной 10 м, выведенный из положения равновесия, отклонился при первом колебании на 10 см, а при втором на 9 см. Определите время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз.

**9.29.** Пружинный маятник массой 1 кг и с коэффициентом жесткости 2 Н/м, выведенный из положения равновесия, отклонился при первом колебании на 10 см, а при втором на 4 см. Определите период колебаний маятника.

**9.30.** Колебательный контур состоит из последовательно соединённых конденсатора с ёмкостью 12,5 мкФ и катушки с индуктивностью 0,5 Гн, которая намотана из провода, имеющего сопротивление 5 Ом. В начальный момент времени заряд на конденсаторе был равен 2,5 мКл. Запишите формулу зависимости от времени для разности потенциалов  $U$  на обкладках конденсатора.

**9.31.** Колебательный контур состоит из последовательно соединённых конденсатора с ёмкостью 12,5 мкФ, катушки с индуктивностью 0,5 Гн, резистора с сопротивлением 500 Ом и ключа. В начальный момент времени ключ был разомкнут, при этом заряд конденсатора равнялся 2,5 мКл. Запишите формулу зависимости от времени для разности потенциалов  $U$  на обкладках конденсатора после замыкания ключа.

**9.32.** За 10 с амплитуда колебаний уменьшается в 10 раз. Определите время, за которое в 10 уменьшается полная энергия системы.

**9.33.** Амплитуда колебаний системы за 100 колебаний уменьшается в  $2e$  раз. Чему равна добротность системы?

## Тема 10.

## ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ. ВОЛНЫ

**10.1.** Вагон массой  $5 \cdot 10^4$  кг имеет четыре рессоры с жесткостью пружин по  $4,5 \cdot 10^5$  Н/м. При какой скорости вагон начинает сильно раскачиваться вследствие толчков на стыках? Длина рельса 25 м. Скорость выразите в километрах в час.

**10.2.** Электрический контур содержит последовательно соединённые конденсатор с ёмкостью 100 нФ, катушку с индуктивностью 2,5 мГн и резистор с сопротивлением 100 Ом. На сколько процентов отличаются частота собственных электрических колебаний в контуре и его резонансная (по напряжению) частота?

**10.3.** Период собственных колебаний пружинного маятника в вакууме равен 0,5 с. В вязкой среде период колебаний того же маятника стал равным 0,7 с. Определите (в герцах) резонансную частоту колебаний.

**10.4.** Пружинный маятник (жесткость пружины равна 11,8 Н/м, масса груза 100 г) совершает вынужденные колебания в вязкой среде с коэффициентом затухания 3 кг/с. Амплитудное значение вынуждающей силы задано: 125,3 мН, но её частоту можно менять. Определите максимально достижимое при таком изменении частоты значение амплитуды колебаний маятника.

**10.5.** Два гармонических колебания, происходящих в одном направлении с одинаковыми частотами и амплитудами 1 см, накладываются друг на друга. В результате получается колебание, амплитуда которого равна  $\sqrt{2}$  см. Начальная фаза первого колебания равна  $\pi/4$ . Чему равна начальная фаза второго колебания?

**10.6.** Найдите амплитуду  $A$  и начальную фазу  $\varphi$  гармонического колебания, полученного от сложения двух одинаково направленных колебаний, которые заданы уравнениями  $x = 0,7 \sin(5\pi t + \pi/3)$  дм и  $x = 0,8 \sin(5\pi t + \pi/4)$  дм.

**10.7.** Точка участвует в двух колебаниях, происходящих в одном направлении с одинаковой амплитудой. Начальная фаза первого колебания равна  $30^\circ$ , начальная фаза результирующего колебания равна  $\pi/6$ . Чему равна начальная фаза второго колебания?

**10.8.** Складываются два гармонических колебания, происходящие в одном направлении, первое из которых описывается уравнением  $x_1 = 3\sin(\pi t/3)$  дм, а второе – уравнением  $x_2 = 4\sin(\pi t/3 - \pi/2)$  дм. Запишите уравнение результирующего колебания.

**10.9.** При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми амплитудами и одинаковыми периодами получается результирующее колебание с тем же периодом и той же амплитудой. Найти разность фаз складываемых колебаний.

**10.10.** Запишите уравнение результирующего колебания, возникающего при сложении двух колебаний, происходящих в одном направлении. В первом колебании импульс колеблющейся точки меняется по закону  $p_1 = 0,03\cos(\pi t/3)$  м/с, во втором – по закону  $p_2 = 0,04\cos(\pi t/3)$  м/с; масса точки равна 100 г.

**10.11.** Точка одновременно участвует в двух гармонических колебаниях, происходящих в одном направлении. В одном колебании ускорение точки меняется по закону  $a_1 = 3\sin(\pi t/2)$  см/с<sup>2</sup>, в другом – по закону  $a_2 = 4\sin(\pi t/2)$  см/с<sup>2</sup>. Запишите уравнение колебаний точки.

**10.12.** Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, заданных уравнениями  $x = 2\sin(\pi t + 3\pi/2)$  дм и  $y = 3\cos(\pi t + \pi/2)$  дм. Постройте траекторию движения точки с указанием направления этого движения.

**10.13.** Постройте (с указанием направления) траекторию движения точки, участвующей одновременно в двух колебаниях, которые происходят в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Колебания описываются уравнениями  $x = 5\cos(2\pi t + \pi/2)$  см и  $y = 7\sin(2\pi t + 5\pi/2)$  см.

**10.14.** Шарик массой 10 г одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях. В первом колебании ускорение шарика меняется по закону  $a_x = 3\sin(\pi t/2)$  см/с<sup>2</sup>, во втором – по закону  $a_y = 4\sin(\pi t/2)$  см/с<sup>2</sup>. Запишите уравнения, по которым происходит изменение со временем: а) импульса  $p$  шарика; б) возвращающей силы  $F$ , действующей на шарик; в) кинетической энергии  $W_k$ ; г) полной энергии  $E_{\text{полн}}$  шарика. Начертите траекторию движения шарика.

**10.15.** Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях. Известно, что в первом колебании скорость меняется по закону  $v_x = 2\cos(2\pi t)$  см/с, во втором колебании по закону  $a_y = 4\cos(2\pi t)$  см/с<sup>2</sup> меняется ускорение. Постройте траекторию (с указанием направления) движения точки.

**10.16.** В результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний траекторией движения точки оказывается окружность. Чему при этом равна разность фаз колебаний?

**10.17.** Колебания первой точки вдоль одной оси происходят по закону  $x = 3\sin(\omega t)$  см, а вдоль другой – по закону  $y = \sqrt{3}\sin(\omega t)$  см. Колебания второй точки происходят по законам:  $x = \sqrt{3}\sin(\omega t)$  см и  $y = 3\sin(\omega t)$  см. Чему равен угол между направлениями результирующих колебаний точек?

**10.18.** Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, описываемых уравнениями:  $x = 2\sin(\pi t)$  см и  $y = 3\sin(2\pi t)$  см. Постройте траекторию движения точки.

**10.19.** Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, которые описываются уравнениями:  $x = 3\sin(\pi t)$  см и  $y = 2\sin(0,5\pi t)$  см. Постройте траекторию движения точки.

**10.20.** На расстоянии 100 м от источника колебаний с амплитудой 2 мм смещение колеблющейся точки в некоторый момент времени равно 1 мм. В это же время смещение точки, которая находится на расстоянии 150 м от источника, оказывается равным нулю. При какой максимальной длине волны это может иметь место?

**10.21.** Звуковые колебания, имеющие амплитуду 0,35 мм, распространяются вдоль рельса. Длина волны равна 55 мм. Во сколько раз отличаются скорость волны и максимальная скорость колеблющихся частиц в ней?

**10.22.** Диафрагма динамика вокзальной системы оповещения колеблется по закону  $x = 2\sin(\pi t)$  мм. Найти модули смещения  $\xi$  от положения равновесия, скорости  $v$  и ускорения  $a$  тех колеблющихся молекул воздуха, которые через 2 с после начала колебаний



находились на расстоянии 20 м от динамика. Скорость звука в воздухе 330 м/с.

**10.23.** Максимальное значение скорости колебаний частиц в плоской звуковой волне равно  $10^{-5}$  м/с, максимальное значение ускорения равно  $10^{-2}$  м/с<sup>2</sup>. Скорость волны составляет 330 м/с. Чему равна длина этой волны?

**10.24.** Звуковая волна распространяется в стали со скоростью 5000 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, колеблющимися в противофазе, равно 1 м. Определите частоту колебаний.

**10.25.** Две точки рельса находятся на расстоянии 25 м друг от друга. Вдоль рельса распространяется звуковая волна со скоростью 5000 м/с, период которой равен 0,02 с. Вычислите разность фаз колебаний в этих точках.

## Тема 11.

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

**11.1.** По поверхности воды от одного и того же источника  $A$  распространяются две волны с длиной волны  $37$  мм (рис. 11.1). После отражения от твёрдых препятствий  $B$  и  $D$  волны сходятся в некоторой точке  $C$ . При этом  $AB = 232,5$  мм,  $BC = 517,5$  мм;  $AD = 363,5$  мм;  $DC = 423,5$  мм. Что будет наблюдаться в точке  $C$ : максимум или минимум интерференционной картины?

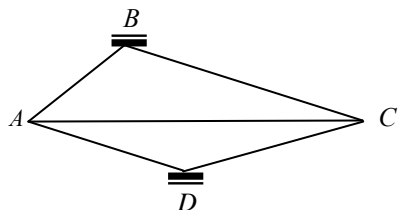


Рис. 11.1

**11.2.** По поверхности воды от одного и того же источника  $A$  распространяются две волны с длиной волны  $37$  мм (рис. 11.2). После отражения от твёрдых препятствий  $B$ ,  $D$  и  $E$  волны сходятся в некоторой точке  $C$ .  $AB = 232,5$  мм,  $BC = 517,5$  мм;  $AD = 363,5$  мм;  $DE = 223,5$  мм,  $EC = 200$  мм. Что будет наблюдаться в точке  $C$ : максимум или минимум интерференционной картины?

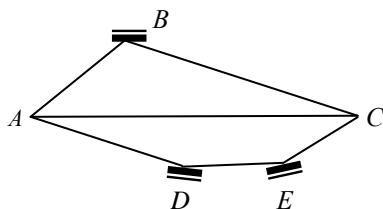


Рис. 11.2

**11.3.** Оптическая разность хода двух интерферирующих волн с одинаковой начальной фазой равна  $0,5\lambda$ . Покажите, что колебания в этих волнах происходят в противофазе.

**11.4.** Можно ли наблюдать чёткую интерференционную картину двух лучей, испускаемых источником света, если длительность волнового цуга равна  $10^{-8}$  с, а разность хода лучей составляет  $1$  мм?

**11.5.** Во сколько раз уменьшится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если оранжевый светофильтр заменить синим? Длина волны оранжевого света  $630$  нм, длина волны синего света  $420$  нм.

**11.6.** В опыте Юнга отверстия освещаются красным светом с длиной волны  $680$  нм. Расстояние между щелями  $0,5$  мм, расстояние до экрана, на котором наблюдается результат интерференции

волн 2 м. Найдите расстояние между первой и пятой (от центра) светлыми полосами на экране.

**11.7.** Во сколько раз изменится расстояние от центра интерференционной картины до первой светлой полосы в опыте Юнга, если опыт проводить в среде с показателем преломления 1,5?

**11.8.** Найдите, под каким углом будет наблюдаться минимум третьего порядка в опыте Юнга, если расстояние между щелями 1 мм, а длина волны света 600 нм.

**11.9.** Какого порядка максимум будет наблюдаться в опыте Юнга в том месте, где наблюдался максимум шестого порядка для синего света с длиной волны 453 нм, если синий светофильтр заменить красным, пропускающим свет с длиной волны 680 нм?

**11.10.** Найдите оптическую разность хода двух монохроматических лучей, если первый прошёл сквозь пластину из стекла с показателем преломления 1,6, а второй - сквозь воду (показатель преломления 1,33). Толщины стеклянной пластины и водной среды одинаковы и равны 20 мм. Какой разности фаз соответствует эта разность хода при длине световой волны 540 нм?

**11.11.** Луч света проходит сквозь плоско-параллельную пластину с показателем преломления  $n = 1,5$ , падая на неё из воздуха перпендикулярно границе раздела. Пластину поворачивают так, что угол падения луча становится равным  $\alpha = 45^\circ$ . Во сколько раз при этом меняется оптический путь луча в толще пластины?

**11.12.** Вычислите оптическую разность хода лучей 1 и 2, прошедших сквозь стеклянную призму с показателем преломления 1,5 (рис. 11.3). Окружающая среда – воздух;  $d = 1$  мм.

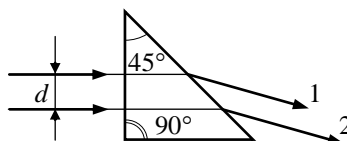


Рис. 11.3

**11.13.** Радиус кривизны линзы равен 1,0 м. Какой должна быть длина волны падающего света, чтобы пятое светлое кольцо при наблюдении в отражённом свете имело диаметр 3 мм?

**11.14.** В установке для получения колец Ньютона на воздухе наблюдение ведётся в проходящем свете. Радиусы двух соседних светлых колец равны  $r_m = 3,30$  мм и  $r_{m+1} = 3,81$  мм. Радиус кривиз-

ны линзы  $R = 6,4$  м. Найдите порядковые номера колец и длину волны  $\lambda$  падающего света.

**11.15.** Наблюдение колец Ньютона ведётся в отражённом свете. Найдите отношение радиусов пятого и седьмого светлых колец.

**11.16.** Известно, что расстояние между десятым и двадцатым светлыми кольцами Ньютона при наблюдении в проходящем свете равно 1,67 мм. Найдите расстояние при наблюдении в тех же условиях между десятым и девятым светлыми кольцами.

**11.17.** Монохроматический свет падает нормально на установку для получения колец Ньютона. Наблюдение ведётся в отражённом свете. Какого порядка светлые кольца пространственно совпадают, если длины волн падающего света равны, соответственно, 390 мкм и 702 мкм?

**11.18.** Во сколько раз изменится радиус третьего светлого кольца Ньютона при наблюдении в отражённом монохроматическом свете, если пространство между линзой и подложкой заполнить оптически прозрачной средой с показателем преломления 1,69? Показатель преломления стекла, из которого изготовлены линза и подложка, равен 1,4.

**11.19.** Белый свет падает нормально на тонкую плёнку толщиной 0,2 мкм с показателем преломления 1,7. Какие длины волн видимого диапазона ослабляются в отражённом свете?

**11.20.** Каков показатель преломления вещества, из которого состоит тонкая плёнка, если при толщине плёнки 0,4 мкм сквозь неё лучше всего проходит свет с длиной волны 600 нм? Угол преломления луча, входящего в плёнку, равен  $60^\circ$ .

**11.21.** В какой цвет будут окрашены отражённые лучи, падающие нормально на тонкую плёнку толщиной 0,2 мкм, покрывающую объектив теодолита (показатель преломления стекла 1,6), если показатель вещества плёнки равен 1,5?

**11.22.** На поверхность стеклянного объектива теодолита (показатель преломления  $n_1 = 1,6$ ) нанесена тонкая плёнка с показателем преломления  $n_2 = 1,5$ . При какой наименьшей толщине плёнки  $d$  произойдёт максимальное ослабление отражённого света в оранжевой области спектра ( $\lambda = 600$  нм)?

**11.23.** Свет с длиной волны 400 нм проходит сквозь прозрачную плёнку, практически не отражаясь на её границах. Во сколько раз надо изменить толщину плёнки, с тем, чтобы сквозь неё без отражений проходил свет с длиной волны 600 нм? Окружающая среда – воздух.

**11.24.** Какой максимальной толщины  $d_{\max}$  должна быть пленка дизельного топлива (показатель преломления  $n_1 = 1,5$ ), чтобы её еще не было видно на поверхности воды (показатель преломления  $n_2 = 1,33$ )?

**11.25.** Монохроматический свет с длиной волны 510 нм проходит последовательно через две нанесённые одна поверх другой плёнки с показателями преломления 1,7 и 1,5 соответственно. Какой должна быть суммарная толщина плёнок с тем, чтобы проходящий сквозь систему свет имел максимальную интенсивность? Поглощением света в плёнках пренебречь.

## Тема 12.

## ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

**12.1.** Расстояние от диафрагмы до экрана, на котором ведётся наблюдение дифракции, равно 1 м, расстояние от точечного источника света до диафрагмы тоже 1 м. Диаметр диафрагмы 5 мм. Сколько зон Френеля оказываются открытыми? Длина волны дифрагирующего света 500 нм.

**12.2.** Диаметр четвёртой зоны Френеля для плоской волны 10 мм. На какую величину отличаются радиусы первой и девятой зон Френеля?

**12.3.** Плоская волна с длиной волны  $\lambda = 500$  нм падает на диафрагму диаметром  $d = 3$  мм. На какое расстояние  $\Delta b$  надо подвинуть экран, с тем, чтобы вместо двух зон Френеля оказались открытыми три?

**12.4.** Расстояние от круглой диафрагмы до экрана, на котором ведётся наблюдение дифракции, равно 2 м, расстояние от точечного источника света до диафрагмы 1 м. Диаметр диафрагмы 3 мм. Тёмное или светлое пятно наблюдается в центре экрана? Длина волны дифрагирующего света 675 нм.

**12.5.** На диафрагму диаметром 18 мм падает плоская волна. Расстояние от диафрагмы до экрана, на котором ведётся наблюдение, 1 м. Какова длина волны падающего света, если открыто три зоны Френеля? Можно ли увидеть светлое пятно в центре экрана?

**12.6.** На круглую диафрагму нормально падает монохроматический свет; за диафрагмой параллельно ей расположен экран так, что радиус диафрагмы оказывается равен радиусу первой зоны Френеля. Диафрагму убирают. Во сколько раз меняется интенсивность света в центре экрана?

**12.7.** Плоская световая волна падает на круглую диафрагму диаметром 2 мм. Длина волны 500 нм. Перпендикулярно диафрагме вдоль её оси можно двигать фотоприёмник, измеряя интенсивность света. Найдите расстояние между двумя соседними наиболее удалёнными от диафрагмы точками на этой оси, в которых наблюдаются минимумы интенсивности.

**12.8.** Во сколько раз надо уменьшить ширину щели, чтобы в том месте, где раньше наблюдался минимум четвёртого порядка, мож-

но было наблюдать минимум второго порядка? Свет падает на щель нормально.

**12.9.** Постройте график зависимости угла, под которым будет наблюдаться второй минимум дифракционной картины на щели шириной 0,2 мм, от длины волны падающего на щель света.

**12.10.** Расстояние между двумя ближайшими минимумами, расположенными справа и слева от центрального максимума при дифракции на щели равно 0,6 мм. Какова ширина щели, если изображение наблюдается в монохроматическом свете с длиной волны 600 нм, свет падает на плоскость щели нормально, а экран расположен на расстоянии 1 м от плоскости щели?

**12.11.** Ширина щели в одиннадцать раз больше длины волны падающего света. Каков порядок максимума, который наблюдается под углом  $30^\circ$ ? Центральный максимум считать имеющим нулевой порядок.

**12.12.** Во сколько раз надо увеличить ширину щели с тем, чтобы в том месте, где раньше наблюдался максимум второго порядка, можно было наблюдать максимум четвёртого порядка? Свет падает на щель нормально. Центральный максимум считать имеющим нулевой порядок.

**12.13.** Щель имеет ширину 3 мкм. На неё нормально падает монохроматический свет с длиной волны 450 нм. Какая картина наблюдается под углом дифракции  $13^\circ$ ?

**12.14.** На дифракционную решетку нормально ей падает пучок света; на экране, расположенном за решеткой, наблюдается дифракционная картина. Как изменится эта картина, если окажется, что ширины прозрачных и непрозрачных полос одинаковы?

**12.15.** Сколько штрихов содержит решетка шириной 3 см, если известно, что дифракционный максимум второго порядка для света с длиной волны 600 нм наблюдается под углом  $30^\circ$ ? Свет падает на решётку нормально.

**12.16.** Найдите, чему равно наибольшее количество максимумов а) для фиолетовых лучей света с длиной волны 380 нм и б) для красных лучей с длиной волны 760 нм в дифракционной решётке с периодом 1,52 мкм.

**12.17.** На дифракционную решётку нормально падает свет, содержащий длины волн 760 нм и 380 нм. Постоянная данной решетки равна 1,14 мкм. Каковы могут быть порядки дифракционных максимумов для этих волн?

**12.18.** Найдите расстояние между максимумами третьего и пятого порядков, если на дифракционную решётку нормально падает свет с длиной волны 475 нм, а число штрихов, приходящихся на единицу длины равно  $2000 \text{ см}^{-1}$ ? Расстояние от решётки до экрана равно 1 м.

**12.19.** На расстоянии 50 см от дифракционной решётки параллельно ей расположен квадратный экран  $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ , стороны которого равноудалены от решетки. На решетку нормально падает свет с длиной волны 585 нм. Постоянная решетки равна 4 мкм. Сколько дифракционных максимумов будет наблюдаться на экране?

**12.20.** На дифракционную решетку с периодом 9 мкм нормально падает монохроматическая волна. Чему равна длина волны, если известно, что угол между лучами, дающими спектры второго и третьего порядков, равен  $2^\circ 30'$ ?

**12.21.** Оцените величину длин волн, для которых может наблюдаться дифракция на кристаллах. Входит ли в этот диапазон видимый свет?

**12.22.** Определите расстояние между межатомными плоскостями кристалла, если максимум третьего порядка для электромагнитных волн с длиной 0,15 нм наблюдается при угле падения  $60^\circ$ .

**12.23.** Как изменится угол падения, при котором наблюдается первый порядок дифракции электромагнитного излучения, в результате увеличения длины волны, которой облучают кристалл?

**12.24.** Наибольшее количество максимумов, которое можно наблюдать, меняя угол падения электромагнитной волны на кристалл, равно шести. Под каким углом падения  $\varphi$  следует направить волну на кристалл, чтобы наблюдать максимум третьего порядка?

**12.25.** Длина волны электромагнитного излучения для наблюдения дифракции в кристалле вдвое больше межатомного расстояния. Каково наибольшее количество максимумов, которые можно наблюдать в этих условиях?



### Тема 13.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СВЕТА. ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ

**13.1.** Чему равен угол Брюстера для луча света, падающего из воздуха на поверхность некоторой жидкости, если известно, что преломлённый луч максимально поляризован при угле преломления  $56^\circ$ ?

**13.2.** Пучок лучей естественного света падает на стеклянный шарик радиусом  $R = 3$  см, частично отражаясь от его поверхности (см. рис. 13.1). На каком расстоянии  $x$  от оси пучка находятся лучи, которые, отразившись от поверхности шарика, окажутся полностью поляризованными? Показатель преломления стекла равен  $n = 1,5$ .

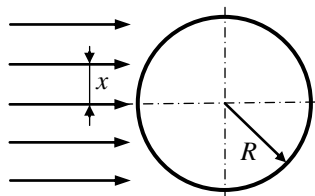


Рис. 13.1

**13.3.** Определите угол полной поляризации и угол полного внутреннего отражения для света, падающего на границу раздела двух сред, показатели преломления которых равны 1,4 и 1,6 соответственно. Рассмотрите случаи прохождения луча сквозь границу как в одном, так и в противоположном направлениях.

**13.4.** При угле падения луча света на границу раздела двух сред, равном  $54^\circ$ , отражённый луч оказывается полностью поляризованным. Можно ли наблюдать на этой границе полное внутреннее отражение?

**13.5.** Определите, каков показатель преломления среды, из которой свет падает на стеклянный клин с показателем преломления 1,7 и углом при вершине  $\alpha = 52^\circ$ , если известно, что отражённый от поверхности клина луч полностью поляризован (рис. 13.2). Луч  $AB$  параллелен основанию клина.

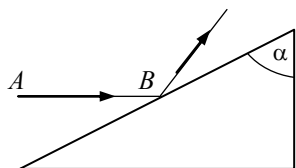


Рис. 13.2

**13.6.** Угол Брюстера при падении света с длиной волны 693 нм из воздуха на прозрачную среду равен  $60^\circ$ . Определите длину волны света и скорость его распространения в этой среде.

**13.7.** От гладкой водной поверхности отражается солнечный луч; после отражения он оказывается полностью поляризованным: это происходит, когда солнце находится под углом  $37^\circ$  к горизонту. Вычислите скорость света в воде.

**13.8.** На систему из двух поляроидов падает естественный свет. Чему равен угол между плоскостями поляризации этих поляроидов, если интенсивность прошедшего света уменьшилась в 8 раз? Потери на отражение и рассеяние света пренебречь.

**13.9.** На сколько процентов уменьшается интенсивность естественного света после прохождения сквозь поляризатор, если известно, что потери света на отражение составляют 10 %?

**13.10.** Во сколько раз уменьшится интенсивность прошедшего оптическую систему луча естественного света, если луч проходит в этой системе два поляроида, угол между плоскостями поляризации которых равен  $\varphi = 45^\circ$ , а коэффициенты рассеяния света в них равны  $\alpha_1 = 0,2$  и  $\alpha_2 = 0,6$  соответственно?

**13.11.** Плоскополяризованный свет проходит через поляроид, при этом его интенсивность уменьшается в 2 раза. Угол между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью поляризации поляроида равен  $30^\circ$ . Часть светового потока отражается от передней поверхности поляроида: найти коэффициент отражения.

**13.12.** Коэффициент отражения света от плоскости поляризатора равен 0,5, коэффициент рассеяния света внутри поляризатора равен 0,4. На сколько процентов меняется интенсивность естественного света в результате прохождения сквозь поляризатор?

**13.13.** Как относятся интенсивности потоков света  $I_1$  и  $I_2$ , прошедших через оптическую систему, изображённую на рис. 13.3? Между поляроидами расположено полупрозрачное зеркало, кото-

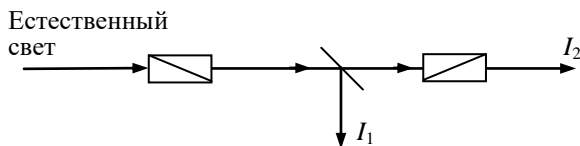


Рис. 13.3

рое разделяет падающий на него поток на две равные части. Угол между плоскостями поляризации поляроидов  $30^\circ$ .

**13.14.** Во сколько раз отличаются интенсивности  $I_1^*$  и  $I_2^*$  потоков света, прошедших сквозь оптическую систему, изображённую на рис. 13.4? Углы между плоскостями поляризации поляроидов для верхнего нижнего лучей равны соответственно  $30^\circ$  и  $45^\circ$ .

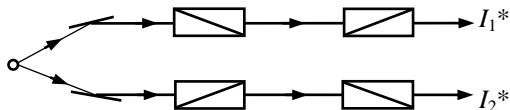


Рис. 13.4

**13.15.** Интенсивность света, прошедшего через пластмассовую пластину, уменьшилась вдвое. Найдите толщину пластины, если известно, что показатель поглощения пластика равен  $34,6 \text{ м}^{-1}$ .

**13.16.** Свет последовательно проходит две среды с показателями поглощения  $0,2 \text{ м}^{-1}$  и  $0,3 \text{ м}^{-1}$  соответственно. Путь, пройденный светом и в той и в другой среде, одинаков и равен  $0,6 \text{ м}$ . Во сколько раз уменьшается интенсивность света?

**13.17.** После прохождения лучом света в некоторой среде пути  $0,5 \text{ м}$  его интенсивность уменьшилась вдвое. Какой путь в той же среде должен пройти луч, чтобы его интенсивность уменьшилась в три раза?

**13.18.** После прохождения лучом света в некоторой среде пути  $0,5 \text{ м}$  его интенсивность уменьшилась вдвое. Какой путь в той же среде должен пройти луч, чтобы его интенсивность уменьшилась в четыре раза?

**13.19.** Во сколько раз изменится интенсивность естественного света, проходящего сквозь оптическую систему, которая состоит из последовательно расположенных стеклянной пластины толщиной  $7 \text{ см}$  с показателем поглощения  $\alpha = \ln 2 \approx 0,693 \text{ м}^{-1}$  и тонкого поляроида? Свет падает на систему нормально.

**13.20.** Свет входит в стеклянную плоскопараллельную пластину толщиной  $d = 10 \text{ см}$  и, отражаясь несколько раз от её граней, выходит наружу (см. рис.13.5). Во сколько раз интенсивность света  $I$  на

выходе из пластины оказывается меньше интенсивности  $I_0$  падающего света? Угол  $\varphi = 60^\circ$ , показатель преломления материала пластины равен  $n = 1,6$ ; её показатель поглощения  $\alpha = 0,18 \text{ м}^{-1}$ .

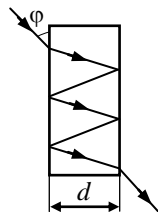


Рис. 13.5

**13.21.** На плоскопараллельную пластину перпендикулярно её поверхности падают два луча света одинаковой интенсивности, но с разными длинами волн. Показатель поглощения вещества, из которого изготовлена пластина, на одной длине волны равен  $25 \text{ м}^{-1}$ , а на другой равен  $15 \text{ м}^{-1}$ . На выходе из пластины отношение интенсивностей лучей оказывается равным 9. Вычислите толщину пластины. Отражением света пренебречь.

**13.22.** Выходной светофор на участке железнодорожного пути подаёт разрешающий зеленый (длина волны  $\lambda = 510 \text{ нм}$ ), предупреждающий жёлтый ( $\lambda = 570 \text{ нм}$ ) и запрещающий красный ( $\lambda = 670 \text{ нм}$ ) сигналы, которые в ясную погоду на некотором расстоянии от светофора воспринимаются как имеющие одинаковую интенсивность ( $I_{510} : I_{570} : I_{670} = 1 : 1 : 1$ ). Найти отношение интенсивностей этих сигналов, наблюдаемых на том же расстоянии, но во время сильного тумана, в предположении, что все изменения интенсивности связаны только с рассеянием света на водяных каплях, размеры которых не больше  $0,1\lambda$ . Известно, что в этих условиях интенсивность красного сигнала упала на 30%.

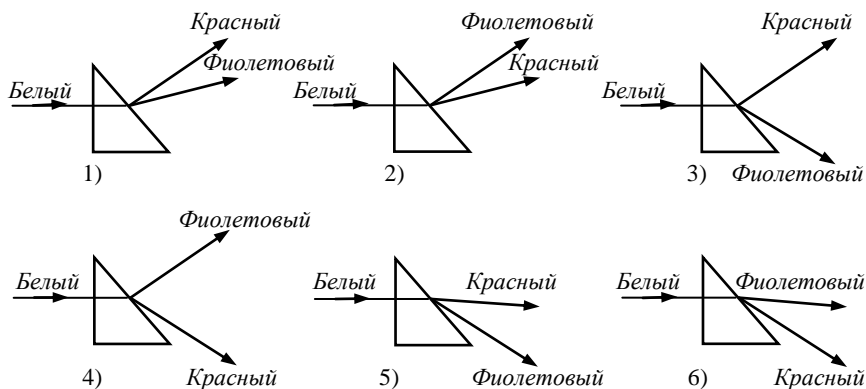


Рис. 13.6

**13.23.** Луч белого света падает на стеклянную призму перпендикулярно одной из её граней. На выходе из призмы свет разлагается в спектр. На рис. 13.6 схематично изображены различные варианты распространения преломлённых лучей: выберите правильный. Ответ поясните.

**13.24.** С целью контроля качества сырья для пищевой промышленности используется сахариметр – устройство, позволяющее измерять концентрацию сахара в растворе, который доставляется цистернами по железной дороге на заводы по изготовлению сахара. При прохождении светового луча сквозь заполненную десятипроцентным раствором сахара трубку прибора длиной 20 см плоскость поляризации света поворачивается на  $5^\circ$ . Трубка длиной 25 см с раствором неизвестной концентрации поворачивает плоскость поляризации света на  $10^\circ$ . Чему равна концентрация сахара во второй трубке?

**13.25.** Естественный свет проходит сквозь оптическую систему, состоящую из поляризатора, кюветы с водой толщиной 49,7 см, находящейся в магнитном поле, индукция которого равна 1 Тл (линии индукции направлены вдоль световых лучей), а затем – сквозь второй поляроид, плоскость поляризации которого параллельная плоскости поляризации первого поляроида. На сколько процентов (по сравнению с исходным значением) меняется интенсивность света на выходе из системы? Постоянная Верде для воды равна  $218,3 \text{ град} \cdot \text{Тл}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

**13.26.** Будет ли пропущен свет поляроидом, если полностью поляризованный свет, вектор напряжённости электрического поля в котором изначально колебался в плоскости поляризации этого поляроида, прошёл перед падением на него слой вещества толщиной 0,5 м, постоянная Верде которого равна  $540 \text{ град} \cdot \text{Тл}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ? Вещество находится в магнитном поле индукцией 2 Тл.

## Тема 14.

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

**14.1.** Считая Солнце источником теплового излучения – абсолютно чёрным телом, оцените, на сколько процентов меняется мощность излучения, которое достигает Земли при изменении температуры на поверхности Солнца с 5950 К до 6050 К.

**14.2.** Определите энергетическую светимость крыши и боковой стороны железнодорожного вагона под воздействием потока солнечного излучения плотностью  $0,8 \text{ кВт/м}^2$ . Крышу вагона считать черным телом, а боковую сторону – серым с поглощательной способностью 0,6. Рассмотреть случаи: а) Солнце находится сбоку от вагона, высота Солнца над горизонтом  $30^\circ$ ; б) Солнце находится в зените; температура окружающего воздуха  $+7^\circ\text{C}$ ).

**14.3.** Одинаковые по площади крыши двух железнодорожных вагонов облучаются нормально падающими лучистыми потоками равной величины. Пассажирский вагон имеет крышу, окрашенную в черный цвет, а вагон рефрижератор – в серый. Считая крышу пассажирского вагона черным телом, а вагона рефрижератора – серым с поглощательной способностью 0,2, определите отношение их энергетических светимостей.

**14.4.** При остывании крыши электровоза в ночное время ее энергетическая светимость уменьшилась в 1,4 раза. До какой температуры была нагрета крыша днем, если ее окончательная температура составила  $+12^\circ\text{C}$ ? Крышу считать серым телом.

**14.5.** Вычислите энергию, излучаемую за 1 мин фрагментом окрашенной в черный цвет крыши железнодорожного вагона площадью  $10 \text{ см}^2$ , нагретой до температуры  $+47^\circ\text{C}$ .

**14.6.** Из смотрового окна печи площадью  $10 \text{ см}^2$  излучается поток энергии  $6 \text{ кДж/мин}$ . Определите температуру печи.

**14.7.** Электрическая печь потребляет мощность 500 Вт. Температура ее внутренней поверхности при открытом отверстии диаметром 5 см равна  $+350^\circ\text{C}$ . Какая часть потребляемой мощности рассеивается стенками?

**14.8.** В электрической лампе железнодорожного вагона с вольфрамовой нитью накаливания в результате колебания напряжения в сети температура нити изменяется на  $\pm 40^{\circ}\text{C}$  от среднего значения  $+2030^{\circ}\text{C}$ . Приняв, что вольфрам излучает как серое тело, определите, во сколько раз меняется общая мощность излучения вследствие колебания температуры.

**14.9.** Спектральная плотность энергетической светимости серого тела на некоторой длине волны в результате остывания уменьшилась в три раза. а) Что произошло с его поглощательной способностью на этой длине волны? б) Как изменится ответ, если тело считать не серым, а абсолютно чёрным?

**14.10.** В купе пассажирского вагона используется электрическая лампа, температура спирали которой при нормальном питающем напряжении составляет 3500 К. В результате падения напряжения в сети положение максимума спектральной плотности энергетической светимости спирали изменилось на 0,1 мкм. До какой температуры охладилась при этом спираль лампы?

**14.11.** Определите во сколько раз нужно изменить температуру черного тела, чтобы максимум спектральной плотности его энергетической светимости сместился в инфракрасную сторону на 1 мкм. Начальную температуру принять равной 3000 К.

**14.12.** Определите, как и во сколько раз изменится частота электромагнитного излучения, соответствующего максимуму спектральной плотности энергетической светимости спирали лампы накаливания при повышении ее температуры от  $+27^{\circ}\text{C}$  до  $+3087^{\circ}\text{C}$ ?

**14.13.** Абсолютно черное тело имеет максимум в спектре излучения при длине волны 540 нм. Определите его температуру и энергетическую светимость.

**14.14.** В пассажирском вагоне для ночного освещения используется тепловой источник света. Определите положение максимума в спектре его излучения, если энергетическая светимость источника равна  $2,4 \text{ кВт/см}^2$ .

**14.15.** Определите, до какой температуры нагрета вольфрамовая спираль лампочки накаливания, график спектральной плотности

энергетической светимости которой изображен на рис.14.1. Каков кпд этой лампы?

**14.16.** Максимум спектральной плотности энергетической светимости электрической лампы в купе пассажирского вагона приходится на 800 нм. Найдите энергетическую светимость спирали лампы, считая её абсолютно черным телом.

**14.17.** В результате колебания напряжения в сети электропоезда максимум в спектре излучения светильника с вольфрамовой нитью накала сместился от 1 мкм до 0,95 мкм. Во сколько раз при этом увеличились температура нити и ее энергетическая светимость? Ответ округлите до второго знака после запятой.

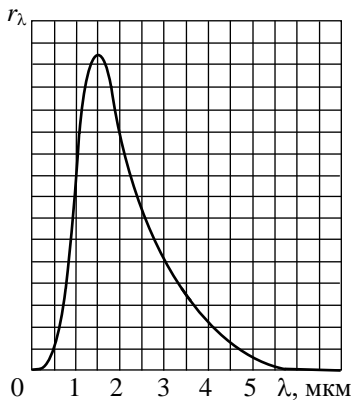
**14.18.** Длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости черного тела, уменьшилась в 1,45 раз при переходе от термодинамической температуры  $T_1$  к  $T_2$ . Как изменилась при этом площадь, ограниченная кривой спектральной плотности энергетической светимости на соответствующем графике?

**14.19.** Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10 кВт. Максимум энергии излучения приходится на 0,7 мкм. Определите площадь излучающей поверхности.

**14.20.** Сколько фотонов испускает за 1 с инфракрасный (длина волны 1,324 нм) лазер системы охранной сигнализации мощностью 12 Вт?

**14.21.** Красная граница фотоэффекта для металла  $6,2 \cdot 10^{-5}$  см. Найдите величину запирающего напряжения при освещении металла светом с длиной волны 365 нм.

**14.22.** В автоматических системах контроля, используемых на железнодорожном транспорте, применяются вакуумные фотоэлементы с различными фотокатодами. При освещении подобного





фотоэлемента фиолетовым светом с длиной волны 0,40 мкм фототок наблюдался при запирающем напряжении 2,0 В. Чему равно запирающее напряжение при освещении того же фотоэлемента красным светом с длиной волны 0,7 мкм?

**14.23.** При каком наименьшем напряжении полностью задерживаются электроны, вырванные из цинкового катода вакуумного фотоэлемента при освещении его ультрафиолетовым светом с длиной волны 229 нм? Работа выхода электрона из цинка равна  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж.

**14.24.** Будет ли наблюдаться фотоэффект при облучении вольфрамовой нити излучением с длиной волны 312 нм?

**14.25.** Какую скорость приобретают фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности цинка (работа выхода 4,0 эВ) при облучении его ультрафиолетовым светом с длиной волны 280 нм?

**14.26.** Вычислите значение солнечной постоянной для Земли: энергии, падающей за одну минуту на  $1 \text{ см}^2$  земной поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения световых лучей. В расчётах излучение Солнца считать близким излучению абсолютно чёрного тела. Температура поверхности Солнца  $T = +5550^\circ\text{C}$ , радиус Солнца  $R_c = 695 \cdot 10^6$  м; средний радиус Земной орбиты  $R_3 = 1,5 \cdot 10^{11}$  м.

## Тема 15.

## ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

**15.1.** Какую температуру имеют 2 г азота, занимающего объем  $820 \text{ см}^3$  при давлении в 1500 мм. рт. ст.? Ответ выразите в градусах Цельсия. Плотность ртути  $13,6 \text{ т/м}^3$ .

**15.2.** Вычислите давление рабочей смеси, которое установится в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания к концу такта сжатия. В начале процесса давление равно 750 мм. рт. ст.; в процессе сжатия температура газовой смеси повышается от  $+57^\circ\text{C}$  до  $+327^\circ\text{C}$ , а объем уменьшается с 1,65 л до  $333,2 \text{ см}^3$ . Ответ выразите в единицах СИ. Плотность ртути  $13,6 \text{ т/м}^3$ .

**15.3.** Современная техника позволяет создавать вакуум до  $10^{-12}$  мм. рт. ст. Сколько молекул газа остаётся при этом в баллоне ёмкостью 6,9 л при температуре  $+47^\circ\text{C}$ ? Плотность ртути  $13,6 \text{ т/м}^3$ .

**15.4.** Десять граммов кислорода находятся под давлением  $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$  при температуре  $+16^\circ\text{C}$ . После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объем  $10027 \text{ см}^3$ . Найти, на какую величину меняется плотность газа в результате расширения.

**15.5.** В запасном резервуаре со сжатым воздухом автоматической тормозной системы пассажирского вагона находилось 10 кг газа при давлении  $10^7 \text{ Па}$ . Найдите, какую массу газа выпустили из резервуара, если после этого давление стало равно  $2,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Температуру газа считать постоянной.

**15.6.** В координатах  $p - V$  начертите графики изотерм для идеального газа в двух случаях: в первом масса газа меньше, чем во втором. Температура газа в обоих случаях одинакова.

**15.7.** В координатах  $p - T$  начертите графики изохорных процессов для идеального газа в двух случаях: в первом масса газа меньше, чем во втором. Объем газа в обоих случаях одинаков.

**15.8.** Посередине откачанной и запаянной с обоих концов горизонтально расположенной трубочки – капилляра, имеющей длину 80 см, находится столбик ртути длиной 16 см. Если капилляр поставить вертикально, то столбик ртути сместится на расстояние

4 см. До какого давления был откачан капилляр? Ответ выразите в миллиметрах ртутного столба.

**15.9.** Для перевозки по железной дороге этилового спирта используются цистерны, снабжённые клапаном, который автоматически открывается и выпускает в атмосферу пары спирта в том случае, если избыточное давление газа внутри цистерны превысит критическое значение  $p_{кр} = 0,15$  МПа. Цистерну частично заполняют спиртом в холодную погоду при температуре  $t_1 = -17^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении  $p_a = 10^5$  Па, плотно закрывают, а затем отправляют по железной дороге. В пути под действием прямых солнечных лучей температура цистерны и её содержимого повышается до  $t_2 = +24^\circ\text{C}$ , возрастает концентрация его паров, в цистерне меняется давление. Считая пары спирта идеальным газом, и полагая, что давление окружающего воздуха осталось тем же, оцените: начнёт ли при этом срабатывать клапан. Известно, что при  $+24^\circ\text{C}$  плотность насыщенных паров этилового спирта  $\rho = 0,11$  кг/м<sup>3</sup>.

**15.10.** Стеклянная колба электрической лампочки накаливания объёмом 540 см<sup>3</sup> заполнена азотом под давлением 0,08 МПа. Колба снабжена тонким коротким кончиком – трубкой, которая после откачки воздуха и впускания в лампу азота запаивается. Сколько молей воды войдёт в колбу, если, неглубоко погрузив её кончиком вниз в сосуд с водой, кончик отломить? Атмосферное давление равно  $10^5$  Па.

**15.11.** В сосуде находится смесь двух газов: 8 г кислорода и 28 г азота. Чему равна масса одного моля смеси?

**15.12.** Определите плотность воздуха при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$ ;  $1,013 \cdot 10^5$  Па), если известно, что он состоит в основном из азота (76 масс. %), кислорода (22 масс. %), паров воды (1 масс. %) и углекислого газа (1 масс. %).

**15.13.** На дне камеры, заполненной газообразным кислородом при нормальных условиях, лежит пенопластовый шарик. До какого давления следует сжать газ в камере с тем, чтобы шарик смог висеть в нем, не падая? Плотность пенопласта 79 кг/м<sup>3</sup>. Температура газа не меняется.

**15.14.** Сколько молекул воды содержится: 1) в одном килограмме, 2) в одном моле 3) в одном литре при  $+4^\circ\text{C}$ ?

**15.15.** В сосуде находится  $\nu = 10^{-7}$  моля кислорода и  $M = 10^{-6}$  г азота. Температура смеси равна  $T = +117^\circ\text{C}$ , при этом давление в сосуде составляет  $p = 10^{-3}$  мм рт. ст. Найдите: а) объем сосуда  $V$ , б) число молекул  $n$  в  $1\text{ см}^3$  этого сосуда. В расчётах используйте, что плотность ртути равна  $\rho = 13600\text{ кг/м}^3$

**15.16.** По газопроводу, предназначенному для нагрева воды автономной системы отопления здания, подаётся газ метан под давлением  $5 \cdot 10^5$  Па, имеющий температуру 275 К. Поперечное сечение трубы газопровода  $11\text{ см}^2$ , за 15 мин через него проходят 28,8 кг газа. Чему равна скорость движения метана по трубе?

**15.17.** Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул воздуха при температуре  $+17^\circ\text{C}$ , отличается от первой космической? Воздух считать однородным газом с молярной массой  $0,029\text{ кг/моль}$ , Землю – шаром радиусом  $6370\text{ км}$ .

**15.18.** В баллоне находится газообразный водород под давлением  $5,76\text{ МПа}$ . Известно, что средняя квадратичная скорость его молекул равна  $2,4\text{ км/с}$ . Чему равно число молекул газа в  $1\text{ см}^3$  баллона?

**15.19.** При какой температуре  $T$  средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на  $\Delta v = 100\text{ м/сек}$ ?

**15.20.** Найти, сколько молекул кислорода содержится в баллоне объёмом  $256\text{ см}^3$ , если известно, что при движении со средней квадратичной скоростью  $400\text{ м/с}$  молекулы газа оказывают на стенки баллона давление  $2 \cdot 10^5\text{ Па}$ ?

**15.21.** Температуру азота увеличили с  $T_1 = +7^\circ\text{C}$  до  $T_1 = +77^\circ\text{C}$ . Для какого значения скорости молекул газа  $v$  значение функции распределения молекул по скоростям не изменилось?

**15.22.** Оцените, на какой высоте атмосферное давление оказывается вдвое меньше, чем у поверхности Земли. В расчётах считать, что температура воздуха практически не меняется с высотой и равна  $+17^\circ\text{C}$ ; молярную массу воздуха принять равной  $29\text{ г/моль}$ . Изменением с высотой ускорения свободного падения пренебречь. Ответ округлите с точностью до километра.

**15.23.** У поверхности Земли в сухом воздухе молекул кислорода в 4 раза меньше, чем молекул азота. Оцените, на какой высоте концентрации молекул кислорода и азота оказались бы одинаковы, если бы температура воздуха не менялась с высотой и составляла бы  $0^{\circ}\text{C}$ ; при этом неизменным оставалось бы и ускорение свободного падения. Ответ округлите с точностью до одного километра.

**15.24.** Найдите, на какую высоту нужно подняться с тем, чтобы показания барометра изменились на 100 Па. Рассмотреть два случая: в первом подъём происходит у поверхности моря, где температура воздуха равна  $+17^{\circ}\text{C}$ , при давлении 100 кПа, во втором – подъём происходит в горах, где температура воздуха равна  $-23^{\circ}\text{C}$ , а давление составляет 70 кПа. Молярную массу воздуха принять равной 29 г/моль.

**15.25.** Азот находится при нормальных условиях в цилиндре, закрытом невесомым легкоподвижным поршнем. На сколько процентов меняется плотность газа при подъёме цилиндра на высоту 300 м? Температуру азота в сосуде и окружающего воздуха считать неизменной.

## Тема 16.

## ТЕРМОДИНАМИКА

**16.1.** Найти кинетическую энергию теплового движения молекул, находящихся в 4 г воздуха при температуре  $+17^{\circ}\text{C}$ . Воздух считать двухатомным идеальным газом с молярной массой  $0,029 \text{ кг/моль}$ .

**16.2.** Чему равна энергия  $W$  теплового движения 20 г кислорода при температуре  $+47^{\circ}\text{C}$ ? Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая – на долю вращательного?

**16.3.** Чему равна кинетическая энергия вращательного движения молекул, содержащихся в 1,1 кг углекислого газа при температуре  $+127^{\circ}\text{C}$ ?

**16.4.** Найдите молярную и удельную теплоемкости кислорода:  
а) при  $V = \text{const}$ ; б) при  $p = \text{const}$ .

**16.5.** Чему равны удельные теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  некоторого двухатомного идеального газа, если плотность этого газа при нормальных условиях равна  $1,89 \text{ кг/м}^3$ ?

**16.6.** Найдите удельные теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  некоторого идеального газа, если известно, что масса одного моля этого газа равна  $28 \times 10^{-3} \text{ кг}$ , а отношение  $c_p/c_v = 1,4$ .

**16.7.** Какое количество тепла надо сообщить 300 г кислорода, с тем, чтобы нагреть его на  $64^{\circ}\text{C}$  при постоянном давлении?

**16.8.** В закрытом сосуде объемом 4 л находится гелий, плотность которого  $1,0 \text{ г/л}$ . Какое количество тепла надо сообщить газу, чтобы нагреть его в этих условиях на  $100^{\circ}\text{C}$ ?

**16.9.** Углекислый газ находится в закрытом сосуде объемом 3 л при давлении 0,3 МПа. После нагревания давление в сосуде повысилось до 2,5 МПа. Какое количество тепла было сообщено газу?

**16.10.** 480 г азота находятся в закрытом сосуде объемом 221,6 л при температуре  $+21^{\circ}\text{C}$ . После нагревания давление в сосуде стало равным 1,134 МПа. Какое количество тепла было сообщено газу при нагревании?

**16.11.** Два литра углекислого газа находятся под постоянным давлением  $10^5$  Па. Какое количество тепла надо сообщить газу в этих условиях с тем, чтобы его объём увеличился вдвое?

**16.12.** Два литра гелия находятся под постоянным давлением  $10^5$  Па. Вследствие остывания объём газа уменьшается вдвое. Какое количество тепла отдаёт при этом газ?

**16.13.** Газообразный азот массой 400 г, остывая на  $84^\circ\text{C}$ , сохраняет при этом неизменный объём. Найти: а) количество теплоты  $\Delta Q$ , отдаваемой газом; б) изменение его внутренней энергии  $\Delta U$ ; в) совершённую над газом работу  $A$ .

**16.14.** Газообразный метан охлаждается при неизменном давлении 80 кПа, при этом его объём уменьшается с  $3\text{ м}^3$  до  $2\text{ м}^3$ . Определите: а) изменение внутренней энергии  $\Delta U$  метана; б) работу  $A$ , совершенную при сжатии газа; в) количество теплоты  $\Delta Q$ , отдаваемой газом.

**16.15.** Газообразный неон массой 100 г был нагрет на  $120^\circ\text{C}$  при постоянном давлении. Определите: а) количество теплоты  $\Delta Q$ , переданное газу; б) работу  $A$  расширения газа; в) приращение его внутренней энергии  $\Delta U$  газа. Молярная масса неона равна 20 г/моль.

**16.16.** Газообразный водород массой  $M = 10$  г расширяется изотермически при температуре  $T = +27^\circ\text{C}$ , причем объём газа увеличивается в два раза. Найти: а) изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$ ; б) совершённую при расширении газа работу  $A$ ; в) количество теплоты  $\Delta Q$ , полученной газом.

**16.17.** Газообразный азот занимает объём  $10^3$  л при давлении 0,2 МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объёма  $3\text{ м}^3$ , а затем при постоянном объёме до давления 0,5 МПа. Найти: а) изменение внутренней энергии  $\Delta U$  газа; б) совершённую им работу  $A$ ; в) количество теплоты  $\Delta Q$ , переданной газу.

**16.18.** При адиабатном расширении азота его давление снижается в 3,5 раза. Как и во сколько раз при этом меняется его термодинамическая температура?

**16.19.** При адиабатном сжатии гелия термодинамическая температура газа возрастает в 3,3 раза. Во сколько раз при этом меняется объём газа?

**16.20.** В сосуде находится газ, о котором известно, что это или гелий, или азот, или углекислый газ. Газ подвергают адиабатическому расширению, при этом оказывается, что при увеличении объёма в 5 раз давление в сосуде снижается с 260 кПа до 30,4 кПа. Какой из газов находится в сосуде?

**16.21.** При адиабатном расширении 220 г углекислого газа его температура понижается на 20°C. Какая при этом совершается работа?

**16.22.** При адиабатном сжатии 0,8 кг газообразного гелия поршнем совершена работа 249,3 кДж. Определите конечную температуру газа, если известно, что до сжатия гелий находился при температуре +27°C.

**16.23.** Один киломоль идеального двухатомного газа участвует в замкнутом цикле, график которого изображен на рис. 16.1. Определите: а) количество теплоты  $Q_n$ , полученное газом от нагревателя; б) количество теплоты  $Q_x$ , переданное газом охладителю; в) работу  $A$ , совершаемую газом за цикл; г) к.п.д.  $\eta$  цикла.

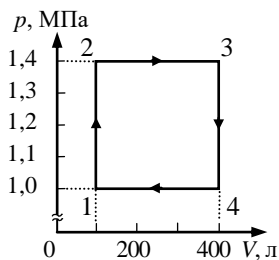


Рис. 16.1

**16.24.** В тепловой машине, работающей по циклу Карно, температура нагревателя в четыре раза выше температуры холодильника. Нагреватель передает рабочему телу машины – идеальному газу количество теплоты 80 кДж. Какую работу совершает машина за один цикл?

**16.25.** Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя равна 470 К, температура холодильника составляет +9 °С. На этапе изотермического расширения газ совершает работу 200 кДж. Определите к.п.д.  $\eta$  машины, а также количество теплоты  $Q_x$ , которое газ отдает холодильнику за один цикл.

**16.26.** Три тепловые машины работают по циклу Карно. Коэффициенты полезного действия первой и второй машин составляют,



соответственно, 0,5 и 0,6, при этом температура холодильника первой машины равна температуре нагревателя второй. Про третью машину известно, что температура её нагревателя равна температуре нагревателя первой машины, а температура холодильника равна температуре холодильника второй машины. Чему равен её к.п.д?

**16.27.** При изохорном нагревании 160 г газообразного водорода его давление возрастает в два раза. Чему равно изменение энтропии газа в этом процессе?

**16.28.** Рассчитайте, каким окажется изменение энтропии 880 г углекислого газа, если его подвергнуть изобарному расширению, увеличивая объём в  $e$  раз (здесь  $e$  – основание натурального логарифма).

**16.29.** Идеальный газ охлаждается, причём график зависимости его температуры от энтропии имеет вид участка 2 – 3 на рис. 16.2. Какое количество теплоты теряет газ в этом процессе?

**16.30.** Определите кпд цикла, изображённого на рис.16.2 в координатах термодинамическая температура – энтропия.

**16.31.** Система переводится из одного состояния в другое, термодинамическая вероятность состояния в  $e$  раз выше. Вычислите, чему равно изменение энтропии системы в этом процессе.

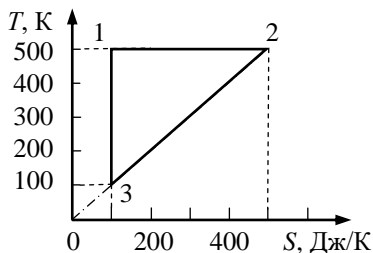


Рис. 16.2

## Тема 17.

## ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ

**17.1.** Оцените размеры объектов, при взаимодействии с которыми могут проявляться волновые свойства а) железнодорожного состава массой 10000 т, движущегося со скоростью 120 км/ч; б) дробинок массой по 1 г, летящих со скоростью 100 м/с; в) электронов, движущихся со скоростью  $10^5$  м/с; г) фотонов с частотой  $10^{14}$  Гц.

**17.2.** Из-за явления дифракции разрешение обычного оптического микроскопа  $\Delta x$  ограничено длиной волны подающего на рассматриваемый объект излучения ( $\Delta x \approx \lambda$ ). В электронном микроскопе исследуемый объект облучается не квантами света, а электронами; отраженные потоки электронов уже не наблюдаются визуально, а фиксируются специальным устройством, преобразующим получаемую картину в изображение, которое можно увидеть глазами. Тот же принцип положен в основу работы ионного микроскопа, только объект облучается не электронами, а потоком ионов. Объясните, почему разрешающая способность электронного микроскопа оказывается выше разрешающей способности оптического, а разрешающая способность ионного, в свою очередь, – больше, чем электронного? Подсчитайте, каких размеров детали можно рассматривать с помощью электронного микроскопа, если облучение объекта производится пучком электронов с энергией 50 кэВ.

**17.3.** Какую дополнительно энергию необходимо сообщить электрону, чтобы уменьшить его длину волны де Бройля со 100 нм до 50 нм?

**17.4.** Микрочастица, электрический заряд которой равен по модулю заряду электрона, проходит ускоряющую разность потенциалов 16,7 В, в результате чего её длина волны де Бройля оказывается равной 7 пм. Что это может быть за частица?

**17.5.** Электрон с длиной волны де Бройля, равной 0,2 нм, преодолевает энергетический барьер, соответствующий затормаживающей разности потенциалов 13,6 В. Определите длину волны де Бройля электрона после торможения.

**17.6.** Определите длину волны де Бройля для атомов гелия, имеющих среднеквадратичную скорость, соответствующую температуре  $+17^{\circ}\text{C}$ .

**17.7.** Согласно теории Бора электрон в атоме водорода может вращаться вокруг ядра по круговой орбите с наименьшим радиусом  $5,29 \cdot 10^{-11}$  м. Чему равна длина волны де Бройля такого электрона?

**17.8.** Электрон влетает в область однородного магнитного поля индукцией  $2,55$  Тл и начинает двигаться по окружности радиусом  $32,5$  мм. Чему равна длина волны де Бройля такого электрона?

**17.9.** При каких скоростях электрона значения его длины волны де Бройля будут лежать в видимой области спектра? Следует ли при таких скоростях учитывать релятивистские эффекты?

**17.10.** Постройте график зависимости длины волны де Бройля релятивистской микрочастицы от её скорости.

**17.11.** В ускорителе элементарных частиц электроны ускоряются разностью потенциалов  $U = 1$  МВ. Подсчитайте, какую они приобретают при этом скорость  $v$ , и какой в результате этого ускорения оказывается их длина волны  $\lambda$ .

**17.12.** При дифракции электронов на кристалле, расстояние между атомными плоскостями кристаллической решетки которого составляет  $d = 0,5$  нм, угол падения, соответствующий наибольшей интенсивности отраженного пучка, оказывается равен  $\theta = 30^{\circ}$ . Какова энергия  $E$  электронов в падающем пучке? Ответ выразите в электронвольтах.

**17.13.** Параллельный пучок электронов, имеющих одинаковую скорость, падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной щелью шириной  $1,7$  мкм. Определить скорость этих электронов, если на экране, отстоящем от щели на расстоянии  $147$  см, ширина центрального дифракционного максимума составляет  $0,36$  мм.

**17.14.** Параллельный пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов  $728$  В, падает нормально на щель шириной  $10^{-6}$  м. Определите ширину центрального максимума дифракционной картины, наблюдаемой на экране, который расположен за щелью на расстоянии  $439$  см от неё.

**17.15.** Оцените, во сколько раз длина волны де Бройля микрочастицы отличается от неопределенности ее координаты, которая соответствует неопределенности импульса в 20 %?

**17.16.** Неопределённость координаты центра масс движущегося шарика массой 1 мг равна 1 мкм. Оцените: а) с какой минимальной погрешностью может быть определена скорость шарика; б) чему будет равна эта погрешность, если вместо шарика взять летящий электрон (с той же неопределённостью координаты)?

**17.17.** На фотографии, полученной в камере Вильсона, зафиксирован след нейтрона, двигавшегося со скоростью 2 км/с. Ширина следа составляет 0,4 мм. Оцените относительную погрешность в определении скорости нейтрона.

**17.18.** Груз пружинного маятника в некоторый момент времени движется со скоростью 3 м/с. Оцените неопределённость координаты груза, если известно, что относительная погрешность в определении его импульса в этот момент составляет 0,1 %. Масса груза равна 100 г.

**17.19.** Известно, что свободный электрон в некоторый момент времени находится в области пространства, которую можно представить в виде шара диаметром 0,1 нм. Чему будет равна неопределённость его координаты спустя 1 с?

**17.20.** Электрон, имеющий кинетическую энергию  $W = 7,28$  эВ, находится в области пространства, которую можно представить в виде шара диаметром  $\Delta x = 1,5$  мкм. Оцените относительную неопределенность  $\Delta v/v$  скорости такого электрона.

**17.21.** Оцените значение минимальной энергии электрона, находящегося в области пространства, соответствующей: а) размерам атома ( $10^{-10}$  м); б) размерам ядра атома ( $10^{-15}$  м). Ответ выразите в электронвольтах.

**17.22.** Энергия покоя микрочастицы, которая находится в области пространства размером  $1,7 \cdot 10^{-6}$  м, равна 191 эВ. Чему равно минимальное значение кинетической энергии микрочастицы? Ответ выразите в электронвольтах.

**17.23.** Время жизни свободного нейтрона составляет в среднем 15 минут (спустя это время он распадается на протон, электрон и

электронное антинейтрино). С какой точностью может быть определена энергия такого нейтрона? Ответ выразите в электронвольтах.

**17.24.** Известно, что атом находится в возбуждённом состоянии в течение  $10^{-8}$  с, после чего испускает фотон и возвращается в основное состояние. С какой точностью могут быть определены: а) энергия, б) импульс и в) координата фотона?

**17.25.** Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии равно  $10^{-8}$  с. При переходе атома в основное состояние испускается квант света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Оцените: а) ширину  $\Delta\lambda$  спектральной линии (неопределённость в длине волны кванта) и б) ее относительную ширину  $\Delta\lambda/\lambda$ .

**17.26.** При переходе атома из возбуждённого состояния в основное испускаются кванты света в интервале длин волн от 658 нм до 660 нм. Оцените величину времени жизни атома в возбуждённом состоянии.

## Тема 18.        МИКРОЧАСТИЦА В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ

**18.1.** Используя соотношения неопределенностей, получите оценочное значение минимальной энергии, которой может обладать микрочастица массой  $m$ , находящаяся в бесконечно глубокой прямоугольной одномерной потенциальной яме шириной  $a$ .

**18.2.** Микрочастица массой  $m$  находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $a$  с бесконечно высокими стенками. В подобной яме разрешёнными являются такие значения энергии, при которых частицу можно рассматривать как стоячую волну с узлами на границах ямы. Пользуясь этим представлением, получите выражение для разрешённых значений энергии микрочастицы.

**18.3.** Микрочастица в одномерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме находится в первом возбуждённом состоянии. Чему равно отношение ширины этой ямы к длине волны де Бройля частицы?

**18.4.** Микрочастица массой  $9,65 \cdot 10^{-29}$  кг находится в прямоугольной одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, при этом её длина волны де Бройля имеет максимально возможное в данной ситуации значение. Известно, что полная энергия микрочастицы на 1 % больше её энергии покоя. Чему равна ширина ямы?

**18.5.** Рассчитайте частоту фотона, который должен быть поглощен электроном, находящимся в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной 1 нм с бесконечно высокими стенками, для того, чтобы он мог перейти из основного (невозбужденного) состояния во второе возбужденное.

**18.6.** Микрочастица массой  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг находится в первом возбуждённом состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной 1 нм с бесконечно высокими стенками. Какую работу надо совершить с тем, чтобы «сжать» яму в 3 раза? Ответ выразите в электронвольтах.

**18.7.** Микрочастица, находящаяся в прямоугольной одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, может пе-

рейти с уровня под номером  $n$  на один уровень выше или на один уровень ниже. При этом оказывается, что для первого из этих переходов требуется в 1,4 раза большая энергия, чем выделяется при втором переходе. Чему равно значение  $n$ , при котором возможна такая ситуация?

**18.8.** Имеются две прямоугольных одномерных потенциальных ямы с бесконечно высокими стенками разной ширины. В результате поглощения фотона микрочастица, находящаяся в первой яме, переходит из основного состояния в первое возбуждённое. В результате поглощения такого же фотона та же микрочастица, находящаяся во второй яме, переходит из основного состояния во второе возбуждённое. Во сколько раз ширина первой ямы  $l_1$  отличается от ширины  $l_2$  второй ямы?

**18.9.** Электрон находится в прямоугольной одномерной потенциальной яме шириной 0,5 нм с бесконечно высокими стенками. При переходе электрона с энергетического уровня под номером  $n$  на другой, соседний, испускается фотон с энергией 4,53 эВ. Найдите номера уровней, между которыми совершается переход.

**18.10.** Электрон находится в трехмерном прямоугольном потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками. Длины ребер ящика одинаковы: по 10 нм. Чему равно минимально возможное значение энергии такого электрона? Ответ выразите в электронвольтах.

**18.11.** Электрон находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Максимальное значение плотности вероятности местонахождения электрона составляет  $10^8 \text{ м}^{-1}$ . Чему равна энергия электрона? Ответ выразите в электронвольтах.

**18.12.** Во сколько раз вероятность обнаружения микрочастицы в невозбужденном состоянии в первой половине одномерной прямоугольной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками отличается от вероятности обнаружения там же этой же частицы, но находящейся в первом возбужденном состоянии?

**18.13.** Чему равна вероятность обнаружения микрочастицы в средней трети одномерной прямоугольной потенциальной ямы с

абсолютно непроницаемыми стенками? Частица находится во втором возбуждённом состоянии.

**18.14.** Для каких значений номера энергетического уровня вероятность  $P$  обнаружения микрочастицы в первой четверти бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной ямы одинакова? Найдите эту вероятность. Задачу решить аналитически и графически (используя графики зависимости плотности вероятности от координаты).

**18.15.** Микрочастица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти вероятность обнаружения частицы в первой трети ямы. Как эта вероятность зависит от ширины ямы?

**18.16.** Во сколько раз отличается вероятность обнаружения микрочастицы, находящейся во втором возбужденном состоянии во второй трети прямоугольной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками, от вероятности обнаружения частицы, находящейся в основном состоянии в той же части ямы?

**18.17.** Энергия микрочастицы массой  $m$ , находящейся в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $a$  с бесконечно высокими стенками, описывается формулой  $E = 2h^2/(ma^2)$ . Чему равна плотность вероятности обнаружения этой микрочастицы в центре ямы?

**18.18.** Частица находится в трёхмерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Чему равна вероятность  $P$  нахождения частицы в области  $a/2 > x > 0$ ;  $b/2 > y > 0$ ;  $c/2 > z > 0$  (здесь  $a$ ,  $b$  и  $c$  – значения ширины ямы по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно)?

**18.19.** Микрочастица массой  $m$ , имеющая кинетическую энергию  $E$ , падает на бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой  $U_0$  ( $E > U_0$ ). Покажите, что коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $D$  на границе барьера можно рассчитать по следующим формулам:

$$R = \left( \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^2, \quad D = \frac{4k_1 \cdot k_2}{(k_1 + k_2)^2},$$

где  $k_1 = (2\pi/h)\sqrt{2mE}$ ;  $k_2 = (2\pi/h)\sqrt{2m(E - U_0)}$ .



**18.20.** Как изменятся коэффициенты  $R$  и  $D$  предыдущей задачи, если направление движения частицы будет обратным?

**18.21.** Электрон с энергией 16 эВ падает на прямоугольный потенциальный барьер бесконечной ширины высотой 7 эВ. Чему равна вероятность  $R$  отражения электрона от барьера? Как изменится ответ, если вместо электрона в задаче будет идти речь о протоне?

**18.22.** Во сколько раз коэффициент отражения  $R_1$  на границе потенциальной ступеньки, изображенной на рис. 18.1.а, отличается от коэффициента отражения  $R_2$  на границе потенциального барьера, изображенного на рис. 18.1.б? Энергия микрочастицы  $E = 3|U_0|$ .

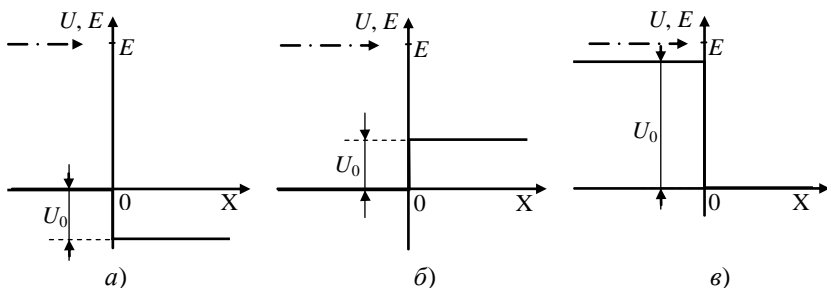


Рис. 18.1

**18.23.** После пересечения границы потенциального барьера, изображенного на рис. 18.1.в, длина волны де Бройля микрочастицы уменьшается в 4 раза. Чему равен коэффициент отражения микрочастицы от границы барьера?

**18.24.** Как следует из классической теории, при термоэлектронной эмиссии все электроны с энергией, большей, чем работа выхода, покидают его. Согласно квантовой механике часть таких электронов все же не выходит из металла, поскольку отражается от границы раздела «металл – окружающая среда». Рассматривая границу раздела как потенциальный барьер, на котором потенциал меняется скачкообразно от  $-10$  В до нуля, определите коэффициент отражения от этой границы для электронов с энергией 0,1 эВ.

**18.25.** Вычислите коэффициент преломления волны де Бройля микрочастицы на низком ( $U_0 < E$ ) прямоугольном потенциальном

барьере бесконечной ширины, если на границе барьера коэффициенты отражения и пропускания одинаковы.

**18.26.** Вычислите, чему равен угол преломления на границе низкого прямоугольного потенциального барьера высотой 0,5 эВ бесконечной ширины по оси  $X$  для электрона, летящего со скоростью  $10^6$  м/с под углом  $30^\circ$  к этой оси.

**18.27.** Микрочастица пролетает над прямоугольной потенциальной ямой глубиной  $U_0 < 0$ . Полагая, что  $|U_0| = |E|$ , где  $E$  – кинетическая энергия свободной микрочастицы, вычислите коэффициент пропускания такого препятствия. Повторными отражениями волны де Бройля на стенках ямы пренебречь.

**18.28.** Электрон с энергией 4 эВ падает на прямоугольный потенциальный барьер высотой 5,82 эВ бесконечной ширины. Найдите эффективную глубину его проникновения в барьер (расстояние, на котором квадрат модуля волновой функции электрона уменьшается в  $e$  раз).

**18.29.** Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 100 В, падает на прямоугольный потенциальный барьер, высота которого равна 200 эВ, а ширина составляет  $3 \cdot 10^{-8}$  мм. Какова вероятность проникновения электрона сквозь этот барьер?

**18.30.** Ускоренный электрическим полем электрон туннелирует сквозь достаточно широкий прямоугольный потенциальный барьер, высота которого в два раза больше энергии электрона. Ускоряющую разность потенциалов увеличивают в два раза. Во сколько раз нужно увеличить высоту барьера с тем, чтобы вероятность прохождения электрона сквозь него не изменилась?

**18.31.** Имеются два прямоугольных потенциальных барьера высотой 6 эВ и 3 эВ и шириной 0,1 нм и 0,2 нм соответственно. Какую энергию следует сообщить микрочастице, чтобы вероятность прохождения её через оба барьера оказалась одинаковой?

**18.32.** Электрон туннелирует сквозь прямоугольный потенциальный барьер шириной 1 нм и высотой 0,1 эВ, при этом отношение амплитуд прошедшей и падающих волн составляет  $1 : e^{3/2}$  (здесь  $e$  – основание натурального логарифма). Чему был равен импульс электрона до его падения на барьер?

**18.33.** Запишите выражения, показывающие, как зависит расстояние  $\Delta E$  между соседними уровнями энергии: а) для микрочастицы, находящейся в одномерной прямоугольной яме с бесконечно высокими стенками; б) для электрона в атоме водорода (используйте формулы, известные из теории Бора); в) для микрочастицы – квантового осциллятора. Сравнивая эти выражения, сделайте вывод о характере зависимости  $\Delta E$  от номера энергетического уровня в каждом из трёх случаев.

**18.34.** Собственная частота колебаний молекулы водорода равна  $1,26 \cdot 10^{14}$  Гц. Рассматривая молекулу как квантовый осциллятор, определите в электронвольтах энергию  $E_0$  её нулевых колебаний, а также – энергию  $\Delta E$  квантов, испускаемых при переходе молекулы из одного энергетического состояния в другое.

**18.35.** Энергия нулевых колебаний квантового осциллятора равна 0,1 эВ. Может ли такой осциллятор поглотить кванты энергии: а) 0,1 эВ; б) 0,2 эВ; в) 0,3 эВ; г) 0,4 эВ; д) 0,5 эВ?

**18.36.** Микрочастица массой  $m$  находится в силовом поле, зависимость потенциальной энергии от декартовых координат в котором описывается формулой

$$U(x, y, z) = \frac{k(x^2 + y^2 + z^2)}{2}.$$

Запишите выражение для полной энергии такой частицы.

## Тема 19.

## ЭЛЕКТРОН В АТОМЕ ВОДОРОДА. МНОГОЭЛЕКТРОННЫЕ АТОМЫ

**19.1.** Электрон в атоме водорода находится в основном состоянии, волновая функция в котором имеет вид:

$$\psi_{100} = C e^{-r/a},$$

где  $a = 0,0529$  нм – боровский радиус,  $r$  – расстояние от ядра атома до электрона (и ядро и электрон считаются точечными зарядами),  $C$  – некоторая постоянная. На каком расстоянии от центра ядра вероятность обнаружения электрона максимальна?

**19.2.** Электрон в атоме водорода находится в основном состоянии, волновая функция в котором имеет вид:

$$\psi_{100} = C e^{-r/a},$$

где  $a = 0,0529$  нм – боровский радиус,  $r$  – расстояние от ядра атома до электрона (и ядро и электрон считаются точечными зарядами),  $C$  – некоторая постоянная. Пользуясь условием нормировки, найдите, чему равна эта постоянная.

**19.3.** Электрон в атоме водорода находится в основном состоянии, волновая функция в котором имеет вид:

$$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-r/a},$$

где  $a = 0,0529$  нм – боровский радиус,  $r$  – расстояние от ядра атома до электрона (и ядро и электрон считаются точечными зарядами). Вычислите вероятность обнаружения электрона внутри сферы диаметром  $2a$ , центр которой совпадает с центром ядра атома.

**19.4.** Электрон в атоме водорода находится в основном состоянии, волновая функция в котором имеет вид:

$$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-r/a},$$

где  $a$  – боровский радиус,  $r$  – расстояние от ядра атома до электрона (и ядро и электрон считаются точечными зарядами). Определите вероятность пребывания электрона в сферическом слое с внутренним радиусом  $r_1 = 0,999a$  и внешним радиусом  $r_2 = 1,001a$ . Какой

вывод можно сделать, сравнивая полученный результат с утверждением, известным как первый постулат Бора?

**19.5.** Определите ширину бесконечно глубокой одномерной потенциальной ямы, если известно, что длина волны излучения, полученного при переходе электрона в этой яме со второго возбуждённого состояния на первое возбуждённое, равна длине волны излучения атома водорода при переходе электрона со второго возбуждённого состояния на первое возбуждённое.

**19.6.** Определите потенциал ионизации атома водорода, находящегося в основном состоянии.

**19.7.** Определите потенциал ионизации атома водорода, находящегося в возбуждённом состоянии с максимальным значением орбитального квантового числа, равным 3.

**19.8.** В результате поглощения кванта электромагнитного излучения атом водорода, находившийся в основном состоянии, теряет электрон и становится ионом. Может ли это произойти под действием кванта излучения, принадлежащего видимой области спектра? Ответ обоснуйте численными оценками.

**19.9.** Узкий пучок атомов рубидия  $^{86}_{37}\text{Rb}$ , находящихся в основном состоянии, пропускается через область неоднородного магнитного поля (рис. 19.1.а), ширина которой равна  $S_1 = 7$  см. Определите силу  $F$ , действующую на атомы рубидия, если расстояние между компонентами пучка на выходе равно  $b = 4$  мм, и при этом известно, что начальная скорость  $v$  атомов была равна 600 м/с.

**19.10.** В опыте Штерна и Герлаха атомы серебра  $^{108}_{47}\text{Ag}$  влетают в область неоднородного магнитного поля протяжённостью  $S_1 = 6$  см (рис. 19.1.а). Вдоль оси Z неоднородность магнитного поля составляет  $6 \cdot 10^3$  Тл/м. На выходе расстояние  $b$  между расщеплёнными компонентами пучка оказывается равным 3 мм. Какова была скорость  $v$  электронов на входе в область поля?

**19.11.** В опыте Штерна и Герлаха узкий пучок атомов цезия  $^{133}_{55}\text{Cs}$ , находящихся в основном состоянии, проходит через область неоднородного магнитного поля, вылетает из него и затем попадает на экран (рис. 19.1.б). Неоднородность магнитного поля в

направлении оси  $Z$  равна  $600 \text{ Тл/м}$ . Расстояния  $S_1 = S_2 = 10 \text{ см}$ , скорость атомов  $\vec{v}$  на входе в систему равна  $300 \text{ м/с}$ . Определите расстояние  $b$  между компонентами расщеплённого пучка.

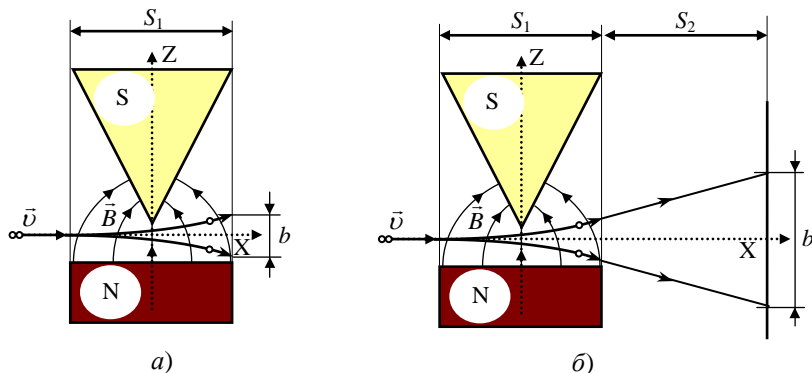


Рис. 19.1

**19.12.** Вычислите значения наименьших углов, которые может образовывать вектор орбитального момента импульса электрона с направлением линий индукции внешнего магнитного поля. Электрон в атоме находится: а) в  $p$ - состоянии; б) в  $d$ - состоянии; в) в  $f$ - состоянии.

**19.13.** Определите возможные значения орбитальных моментов импульса  $L$  электрона, находящегося в атоме водорода в состоянии с энергией  $E = -0,54 \text{ эВ}$ . Какой при этом минимальный угол  $\alpha_{\min}$  может образовывать орбитальный магнитный момент электрона с направлением линий индукции внешнего магнитного поля?

**19.14.** Момент импульса орбитального движения электрона в атоме водорода равен  $2,572 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ . Определите магнитный момент, обусловленный орбитальным движением электрона. В каком состоянии находится электрон?

**19.15.** Электрон в атоме водорода, находившийся первоначально в основном состоянии (потенциал ионизации атома с таким электроном  $\varphi_1 \approx -13,55 \text{ В}$ ), поглотил квант света, обладавший энергией  $12,05 \text{ эВ}$ , и перешёл в возбуждённое состояние. Чему может быть равно максимальное значение орбитального момента импульса  $L_{\max}$  этого электрона в возбуждённом состоянии?

**19.16.** Классическим значением радиуса электрона принято считать величину, равную примерно  $10^{-18}$  м. Приняв электрон за твёрдый шарик, вращающийся вокруг своей оси, вычислите линейную скорость точек на «экваторе» такого шарика. Сравните полученное значение с величиной скорости света в вакууме. Какой вывод можно сделать, проанализировав полученный результат?

**19.17.** Запишите формулы электронных конфигураций для находящихся в основном состоянии атомов следующих элементов:

а)  ${}^9_9\text{F}$ ; б)  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ; в)  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ; г)  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  д)  ${}^{48}_{22}\text{Ti}$ ; е)  ${}^{86}_{37}\text{Rb}$ ; ж)  ${}^{133}_{55}\text{Cs}$ .

**19.18.** Сколько  $d$ - электронов может содержаться в  $K$  (здесь  $n = 1$ ),  $L$  ( $n = 2$ ) и  $M$  ( $n = 3$ ) -оболочках атома? Ответ обоснуйте.

**19.19.** Во сколько раз максимально возможное число  $d$ - электронов в  $M$ - оболочке (для неё  $n = 3$ ) больше числа  $p$ - электронов?

**19.20.**  $N$ - оболочка ( $n = 4$ ) заполнена полностью. На какую величину число  $f$ - электронов в ней больше числа  $d$ - электронов?

**19.21.** Во сколько раз максимально возможное значение орбитального момента импульса электрона  $N$ - оболочки отличается от значения собственного момента импульса этого электрона?

**19.22.** Заполненная оболочка характеризуется главным квантовым  $n = 4$ . Какое число электронов этой оболочки имеет одинаковые значения следующих квантовых чисел:

а)  $l = 3$  при  $m = 2$ ; б)  $l = 3$  при  $m_s = +1/2$ ; в)  $m = 0$  при  $m_s = -1/2$ .

**19.23.** Электронная конфигурация атома цинка может быть представлена в виде  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$ . Определите общее число электронов в атоме, которые имеют одинаковые квантовые числа:

а)  $m = 1$ ; б)  $l = 2$  при  $m_s = +1/2$ ; в)  $m = 0$  при  $m_s = -1/2$ .

**19.24.** В последней оболочке невозбуждённого атома состояния электрона определяются пятью значениями магнитного квантового числа. Сколько электронов в принципе могло бы разместиться на всех оболочках этого атома с первой по последнюю включительно?

**19.25.** Какие значения квантовых чисел  $l$ ,  $m$  и  $m_s$  соответствуют электронному состоянию с  $n = 3$ ? Сколько всего электронов в атоме может характеризоваться главным квантовым числом  $n = 3$ ?

## Тема 20. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

**20.1.** На рис. 20.1 приведены примеры фрагментов кристаллических решёток некоторых веществ. Определите в каждом случае тип кристаллической решётки и рассчитайте, сколько атомов одного сорта в среднем приходится на одну элементарную ячейку.

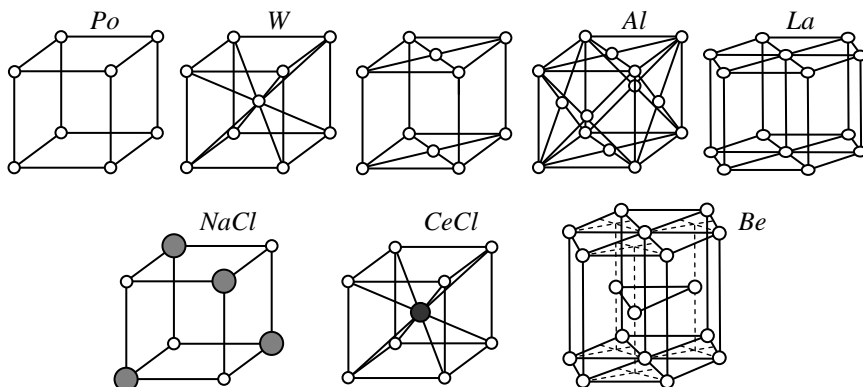


Рис. 20.1

**20.2.** Полагая, что во всех случаях, изображённых на рис. 20.1, рёбра параллелепипедов и призм одинаковы и равны  $a$ , рассчитайте, чему равны расстояния между ближайшими атомами одного сорта соответствующих элементарных ячеек.

**20.3.** Каково число ближайших соседей, находящихся на одинаковом расстоянии от выбранного атома: а) в примитивной кубической решетке; б) в ОЦК- решетке; в) в ГЦК- решетке?

**20.4.** Сколько элементарных ячеек содержится в кристалле меди  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$  размером  $5\text{ мм} \times 10\text{ мм} \times 20\text{ мм}$  (имеющем ГЦК- структуру)? Плотность меди  $8,6\text{ г/см}^3$ . Число Авогадро равно  $6,02 \cdot 10^{23}\text{ моль}^{-1}$ .

**20.5.** Чему равно минимальное расстояние между соседними атомами в решетке кристалла  $\text{Al}$ , если известно, что кристалл размером  $10\text{ мм} \times 10,55\text{ мм} \times 10\text{ мм}$  содержит  $16 \cdot 10^{21}$  элементарных ячеек?



**20.6.** Найти расстояние  $a$  между ближайшими атомами натрия в решетке кристалла поваренной соли (плотность  $\rho = 2160 \text{ кг/м}^3$ ). Молярная масса натрия  $\mu_{\text{Na}} = 23 \text{ г/моль}$ , хлора –  $\mu_{\text{Cl}} = 35 \text{ г/моль}$ .

**20.7.** Покажите, что в гексагональной плотноупакованной решетке выполняется условие  $c/a = \sqrt{8/3}$ , где  $c$  – высота ячейки,  $a$  – длина ребра основания.

**20.8.** Кристаллы лития имеют ОЦК- структуру; ребро куба элементарной ячейки составляет  $0,351 \text{ нм}$ . Плотность металлического лития  $534 \text{ кг/м}^3$ . Пользуясь этими данными, вычислите молярную массу лития.

**20.9.** Запишите кристаллографические индексы узлов, отмеченных на рис. 20.2. Шаг по оси координат соответствует длине вектора трансляции.

**20.10.** Какой смысл имеют обозначения  $[[\bar{3}21]]$ ,  $[3\bar{2}1]$ ,  $[00\bar{1}]$ ,  $[[\bar{1}\bar{2}1]]$ ? Отобразите соответствующие объекты на рисунке.

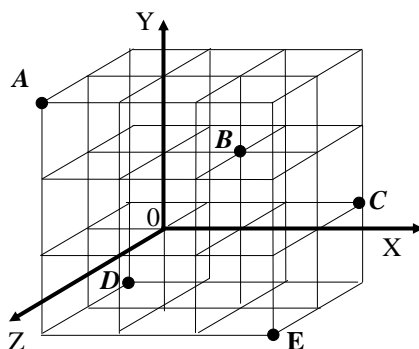


Рис. 20.2

**20.11.** Во сколько раз отличаются площади треугольников, которые получаются, если соединить между собой узлы кубической решётки  $[[220]]$ ,  $[[000]]$  и  $[[400]]$ , а также  $[[021]]$ ,  $[[001]]$  и  $[[300]]$ ?

**20.12.** Запишите индексы направлений для прямых (рис. 20.3); на рисунке шаг по оси координат соответствует длине вектора трансляции.

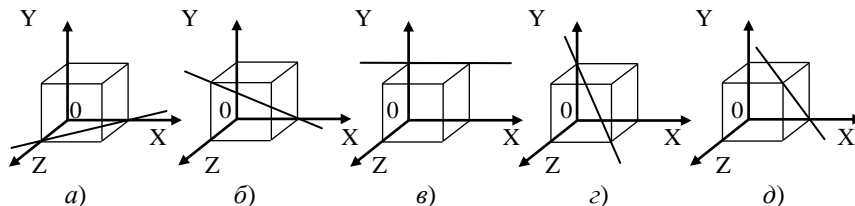


Рис. 20.3

**20.13.** Запишите индексы направлений для прямых, проходящих через точки  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$ ,  $A$  и  $C$ ,  $E$  и  $D$ ,  $B$  и  $E$  на рис. 20.2.

**20.14.** Чему равно расстояние между соседними прямыми, задаваемыми направлением  $[111]$  в кубической решетке с параметром  $a$ ?

**20.15.** Запишите индексы направлений для прямых (рис. 20.4). Шаг по оси координат соответствует длине вектора трансляции.

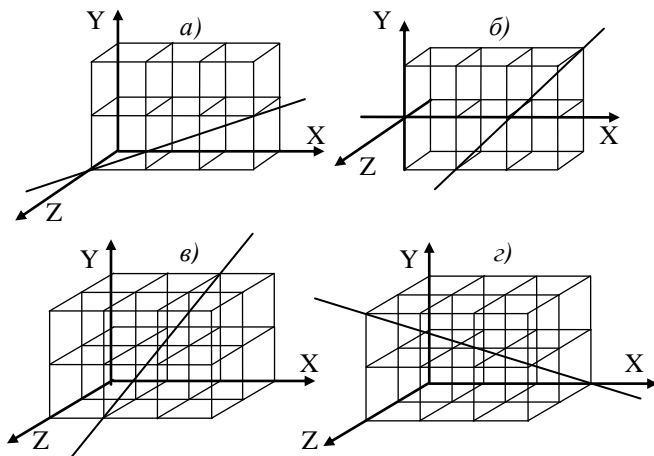


Рис. 20.4

**20.16.** Вычислите, чему равен угол между прямыми, задаваемыми направлениями  $[011]$  и  $[101]$ .

**20.17.** Запишите индексы Миллера для плоскостей  $ABC$  и  $ABCD$  в решётке, ячейки которой изображены на рис. 20.5. Шаг по оси координат соответствует длине вектора трансляции.

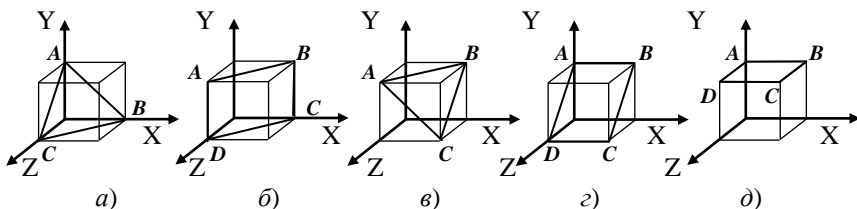


Рис. 20.5

**20.18.** Изобразите на рисунке плоскости в примитивной кубической решетке со следующими индексами Миллера:  $(\bar{1}21)$ ,  $(0\bar{2}1)$ ,  $(00\bar{1})$ ,  $(\bar{1}1\bar{2})$ .

**20.19.** Сколько плоскостей, идентичных плоскости  $(111)$ , но не параллельных ей, можно выявить в примитивной кубической решетке? Запишите индексы этих плоскостей.

**20.20.** Запишите индексы Миллера для плоскостей  $ABC$  и  $ABCD$  в решетке, ячейки которой изображены на рис. 20.6. Шаг по оси координат соответствует длине вектора трансляции.

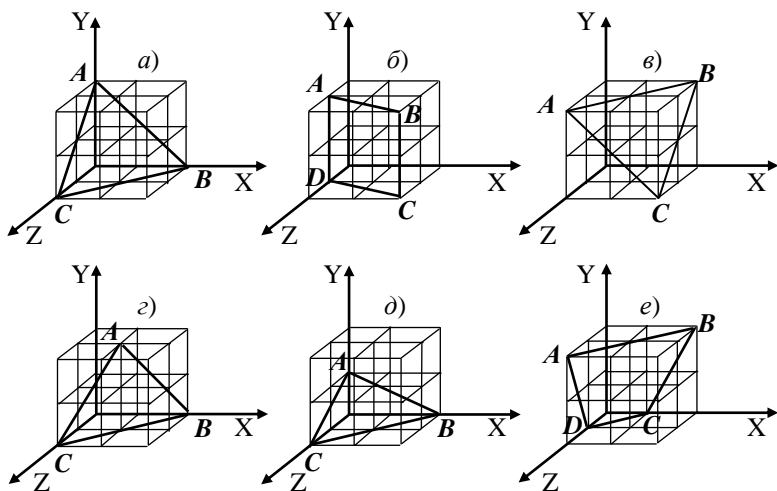


Рис. 20.6

**20.21.** Запишите индексы Миллера для плоскостей, проходящих через точки  $C, D$  и  $E$ ;  $A, D$  и  $E$ ;  $A, D$  и  $C$  на рис. 20.2.

**20.22.** Для примитивной кубической решетки изобразите плоскость, одновременно перпендикулярную плоскостям  $(00\bar{1})$  и  $(120)$ . Запишите индексы Миллера для этой плоскости.

**20.23.** Известно, что  $(111)$  - индексы Миллера некоторой плоскости в примитивной кубической решетке. Изобразите эту плоскость и вычислите площадь треугольника, образованного линиями пересечения этой плоскости с гранями элементарной ячейки этой решетки.

**20.24.** Эксперимент показывает, что лучи рентгеновского излучения с длиной волны  $0,1537 \text{ нм}$ , попадая на кристалл алюминия с ГЦК-структурой под углом падения  $70,8^\circ$ , испытывают отражение от плоскостей (111). Чему равна постоянная решетки алюминия?

**20.25.** Железо и создаваемые на его основе сплавы (прежде всего - стали) является основным материалом, используемым в *технике железнодорожного транспорта*. Технологам хорошо известно, что структура железа неодинакова при разных температурах: в интервале температур до  $+910^\circ\text{C}$  железо имеет ОЦК-, при температуре выше  $+910^\circ\text{C}$  – ГЦК-структуру. Полагая, что каждый атом железа можно считать маленьким шариком, диаметр которого при таком переходе не меняется и что в элементарной ячейке шарики – ближайшие соседи касаются друг друга, оцените, во сколько раз меняется плотность железа при переходе из одного состояния в другое.

## Тема 21.

## ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ. ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ В МЕТАЛЛЕ

**21.1.** Определите, поведение каких частиц описываются функциями распределения Ферми – Дирака, а каких – функциями распределения Бозе – Эйнштейна:  ${}^1_1\text{H}^+$ ,  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^7_3\text{Li}^{++}$ ,  ${}^4_2\text{He}^{++}$ , фотоны, фононы, нейтроны, электроны.

**21.2.** Максимальная скорость свободных электронов в меди при температуре, близкой к нулю Кельвина, равна  $1,57 \times 10^3$  км/с. Вычислите значение энергии Ферми для этого металла и выразите её в электронвольтах.

**21.3.** Энергия Ферми электронов в алюминии при 0 К составляет 11,7 эВ. Чему равна скорость таких электронов?

**21.4.** Энергия Ферми электронов в калии при температуре, близкой к абсолютному нулю, составляет 1,9 эВ. Чему равно максимальное значение импульса электронов в этом металле?

**21.5.** Оцените, во сколько раз отличаются максимально возможное значение скорости электронов в цинке (энергия Ферми 11,0 эВ) при 0,94 К и: а) их среднеквадратичная скорость теплового движения при этой температуре; б) первая космическая скорость для Земли.

**21.6.** Во сколько раз отличаются значения плотности энергетических состояний в металле при значениях энергии свободных электронов в 1 эВ и в  $6,4 \times 10^{-19}$  Дж?

**21.7.** При энергии Ферми (2,5 эВ) плотность энергетических состояний электронов в выращенном в лаборатории монокристалле натрия равна  $14 \times 10^{48}$  Дж<sup>-1</sup>. Чему равна плотность энергетических состояний в этом же образце при энергии свободных электронов 0,1 эВ?

**21.8.** Известно, что в одном и том же кристалле меди плотность энергетических состояний свободных электронов при энергии  $E_1$  в два раза выше плотности состояний при энергии  $E_2$ . Во сколько раз отличается общее число состояний в интервале  $0 < E < E_1$  от числа состояний в интервале  $0 < E < E_2$ ?

**21.9.** Во сколько раз общее число энергетических состояний, занятых свободными электронами в металле, отличается от числа энергетических состояний, занятых свободными электронами, скорость которых не превышает половины от максимально возможного для данного металла значения? Температура равна 0 К.

**21.10.** При 0 К максимальный импульс свободных электронов в некотором металле равен  $5,46 \times 10^{-25}$  кг·м/с. Для какого из значений энергии электронов: 0,5 эВ, 1,0 эВ или 1,5 эВ среднее число свободных электронов в соответствующем энергетическом состоянии максимально, и для какого – минимально?

**21.11.** Максимальная скорость свободных электронов в некотором металле при 0 К равна  $1,6 \times 10^6$  м/с. Чему равно среднее число электронов, приходящихся в этом же металле на одно энергетическое состояние с энергией 7,28 эВ при температуре 5 К?

**21.12.** При 3 К среднее число  $N^*$  свободных электронов, приходящихся в металле на одно энергетическое состояние с некоторым значением энергии  $E$ , равно половине от максимально возможного. Температуру металла понижают до 2 К. Чему при этой температуре станет равным значение  $N^*$  для электронов, имеющих ту же энергию  $E$ ? Ответ обоснуйте соответствующими формулами.

**21.13.** Минимально возможное значение длины волны де Бройля для свободных электронов в некотором металле равно 0,6 нм. Чему равно среднее число электронов, приходящихся в этом металле при 0 К на одно энергетическое состояние с энергией 4,5 эВ?

**21.14.** В металле среднее число свободных электронов, приходящихся на одно энергетическое состояние с энергией, которая на  $\Delta E = 0,01$  эВ больше энергии Ферми, составляет  $N^* = 0,269$ . При какой температуре  $T$  находится металл?

**21.15.** Вычислите отношение концентраций свободных электронов в литии (энергия Ферми 4,7 эВ) и калии (1,9 эВ) при 0 К.

**21.16.** Во сколько раз отличаются значения концентрации свободных электронов для двух металлов, находящихся при 0 К, у одного из которых энергия Ферми равна 5,55 эВ, а во втором длина волны де Бройля, соответствующая электронам с максимальным импульсом, равна 0,6 нм?

**21.17.** При 0 К число свободных электронов в  $7,1 \text{ см}^3$  лития (энергия Ферми  $4,7 \text{ эВ}$ ) в 1,8 раз выше, чем число таких электронов в  $1 \text{ см}^3$  алюминия. Чему равна энергия Ферми для алюминия?

**21.18.** Во сколько раз общее число свободных электронов в металле при 0 К превышает число электронов с энергией  $E < 0,1E_F$  (здесь  $E_F$  – энергия Ферми)?

**21.19.** Во сколько раз общее число свободных электронов в металле при 0 К превышает число электронов, энергия которых отличается от энергии Ферми не более, чем на 1%?

**21.20.** Для находящегося при 0 К металла с энергией Ферми  $E_F$  найдите такое значение энергии  $E^*$ , для которого число свободных электронов с  $E < E^*$  равно числу электронов с  $E > E^*$ .

**21.21.** Во сколько раз общее число свободных электронов  $N_0$  в бериллии (энергия Ферми  $E_F = 12 \text{ эВ}$ ) при  $T = 0 \text{ К}$  превышает в этом металле число  $N$  свободных электронов, длина волны де Бройля которых составляет не менее  $\lambda = 0,5 \text{ нм}$ ?

**21.22.** Найдите среднюю энергию  $E_{\text{ср}}$  свободных электронов в натрии при 0 К, если известно, что энергия Ферми для этого металла  $E_F = 2,5 \text{ эВ}$ .

**21.23.** Средняя энергия свободных электронов в некотором металле при 0 К равна  $1,86 \text{ эВ}$ . Какова максимальная скорость электронов в этом металле?

**21.24.** Энергия Ферми для кальция  $E_F = 3,0 \text{ эВ}$ . Найдите среднее значение импульса  $p_{\text{ср}}$  свободных электронов в этом металле при  $T = 0 \text{ К}$ .

## Тема 22. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**22.1.** Во сколько раз ширина запрещенной зоны сульфида цинка ( $ZnS$ ) отличается от ширины запрещенной зоны серого олова ( $Sn$ )? Известно, что уровень Ферми в  $ZnS$  (без примесей) находится на расстоянии 1,8 эВ от дна зоны проводимости, а уровень Ферми в чистом сером олове находится на расстоянии 0,05 эВ от потолка валентной зоны.

**22.2.** Для возникновения дырки в акцепторном полупроводнике при  $T \approx 0$  К требуется энергия 0,01 эВ, а для возникновения электронно-дырочной пары – энергия 0,74 эВ. Какая потребуется энергия для перевода электрона с акцепторных уровней в зону проводимости, если вместо используемых атомов – акцепторов полупроводник легировать другими атомами, тоже создающими акцепторные уровни, но лежащими в запрещенной зоне на 0,03 эВ глубже?

**22.3.** Ширина запрещенной зоны нелегированного германия ( $Ge$ , элемент IV столбца таблицы Менделеева) при температуре  $T \approx 0$  К равна 0,75 эВ. Если германий легировать сурьмой ( $Sb$ , элемент V столбца таблицы Менделеева), на зонной схеме возникнет уровень, отстоящий от ближайшей зоны на 0,01 эВ. На какую величину отличаются энергии уровней Ферми в чистом и в легированном германии?

**22.4.** Уровень Ферми нелегированного кремния ( $Si$ , элемент IV столбца таблицы Менделеева) при температуре  $T \approx 0$  К находится на расстоянии 0,60 эВ от потолка валентной зоны. В кремнии, легированном алюминием ( $Al$ , элемент III столбца таблицы Менделеева), расстояние от уровня Ферми до ближайшей зоны равно 0,06 эВ. Найдите разницу энергий, соответствующих уровням Ферми этих образцов.

**22.5.** Во сколько раз при температуре  $T \approx 0$  К ширина запрещенной зоны в чистом кремнии больше ширины запрещенной зоны в чистом германии, если известно, что расстояние от дна зоны проводимости до уровня Ферми в германии равно 0,37 эВ, а расстояние до уровня Ферми от потолка валентной зоны в кремнии равно 0,60 эВ?



**22.6.** При введении атомов сурьмы (*Sb*, элемент V столбца таблицы Менделеева) в полупроводник – элемент IV столбца таблицы Менделеева в запрещённой зоне возникает энергетический уровень, которому соответствует энергия Ферми 0,005 эВ. При введении в этот же материал вместо сурьмы атомов галлия (*Ga*, элемент III столбца таблицы Менделеева) в запрещённой зоне возникает энергетический уровень, которому соответствует энергия Ферми 0,005 эВ. В этом же полупроводнике, легированном одновременно и сурьмой и галлием, переход электрона с уровня сурьмы на уровень галлия сопровождается изменением энергии электрона на 1,19 эВ. Чему равна ширина запрещённой зоны полупроводника – основы? Температура  $T \approx 0$  К. Изменением положения энергетических уровней ионов сурьмы и ионов галлия вследствие их взаимодействия пренебречь.

**22.7.** Если некоторый полупроводник не легирован, его уровень Ферми располагается на расстоянии 0,605 эВ от потолка валентной зоны; при легировании только донорной примесью возникает уровень, отстоящий от середины запрещённой зоны на 0,6 эВ, а при легировании только акцепторной – уровень, отстоящий от потолка валентной зоны на 0,01 эВ. Начертите зонную схему полупроводника, отметив (в масштабе) на вертикальной оси значения энергии уровней донорной и акцепторной примесей, потолка валентной зоны. За начало отсчёта энергии примите дно зоны проводимости.

**22.8.** Один и тот же полупроводник можно легировать донорной примесью, а можно – акцепторной. Начертите зонную схему полупроводника, отметив (в масштабе) на вертикальной оси значения энергии уровней примеси обоих типов и потолка валентной зоны (за начало отсчёта энергии примите дно зоны проводимости), если известно, что при температуре  $T \approx 0$  К расстояние между уровнем Ферми собственного полупроводника и уровнем Ферми получаемого в результате легирования проводника *n*- типа равно 0,385 эВ, а между уровнями донора и акцептора оно составляет 0,74 эВ. При этом энергия, необходимая для образования свободной дырки с участием акцептора, на 0,002 эВ больше минимальной энергии, необходимой для перехода электрона с донорного уровня в ближайшую зону. Возможным изменением положения энергетических уровней доноров и акцепторов вследствие их взаимодействия пренебречь.

**22.9.** При близкой к комнатной температуре (300 К) германий и кремний имеют один тот же тип кристаллической решётки, но ширина запрещённой зоны у германия равна 0,66 эВ, а у кремния 1,08 эВ. Во сколько раз в этих условиях концентрация электронов проводимости в чистом германии выше концентрации дырок в чистом кремнии? Эффективные масса электронов и дырок считать одинаковыми.

**22.10.** При близкой к комнатной температуре (300 К) такой же тип кристаллической решетки, как у германия имеет серое олово. Известно, что при такой температуре ширина запрещённой зоны чистого германия равна 0,66 эВ, причём концентрация электронов проводимости в нём в  $10^5$  раз меньше концентрации электронов проводимости в чистом олове. Чему равна (в электронвольтах) энергия, необходимая для образования электронно-дырочной пары в олове при 300 К? Эффективные масса электронов и дырок считать одинаковыми.

**22.11.** Оцените, во сколько раз концентрация равновесных электронно-дырочных пар при 300 К в чистом кремнии (ширина запрещённой зоны – около 1 эВ) больше концентрации равновесных электронно-дырочных пар, существующих при той же температуре в алмазе (углерод, ширина запрещённой зоны – около 7 эВ). Эффективные масса электронов и дырок считать одинаковыми.

**22.12.** Ширина запрещённой зоны собственного полупроводника 1,2 эВ. Найти отношение числа электронов в этом полупроводнике при 240 К к числу дырок в нём же при 80 К. Эффективные масса электронов и дырок считать одинаковыми.

**22.13.** При температуре 200 К подвижность электронов в некотором полупроводнике равна  $0,024 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Полагая, что основной вклад в рассеяние носителей заряда при данной температуре вносит рассеяние на колебаниях атомов кристаллической решетки, оцените, чему будет равна подвижность свободных электронов в этом материале при 800 К.

**22.14.** При температуре 200 К подвижность электронов в кремнии, легированном фосфором, равна  $0,04 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Полагая, что основной вклад в рассеяние носителей заряда при данной температуре вносит рассеяние на заряженных точечных дефектах кристал-

лической решётки, оцените, чему будет равна подвижность свободных электронов в этом материале при 50 К.

**22.15.** При повышении температуры с  $T_1 = -50^\circ\text{C}$  до  $T_2 = +270^\circ\text{C}$  подвижность свободных электронов в некотором полупроводнике меняется от  $\mu_1 = 156 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  до  $\mu_2 = 41 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Оцените, какой станет подвижность  $\mu_3$  электронов в этом материале при  $T_3 = 400 \text{ К}$ .

**22.16.** При понижении температуры от  $T_1 = 800 \text{ К}$  до  $T_2 = -70^\circ\text{C}$  подвижность электронов в образце кремния, легированного фосфором, меняется от  $\mu_1 = 70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  до  $\mu_2 = 250 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . При  $T_3 = +100^\circ\text{C}$  подвижность электронов  $\mu_3 = 200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Какие предположения можно сделать о механизме рассеяния электронов в различных участках рассматриваемого диапазона температур?

**22.17.** Чему равна минимальная энергия, расходуемая на образование электронно-дырочной пары в собственном полупроводнике, удельная электропроводность которого возрастает в 7 раз при увеличении температуры от  $+17^\circ\text{C}$  до 400 К? Рассеяние носителей заряда в данном полупроводнике обусловлено их взаимодействием с колеблющимися атомами кристаллической решетки.

**22.18.** Собственный полупроводник, потолок валентной зоны которого находится на 1,38 эВ ниже дна зоны проводимости, нагревают от  $-73^\circ\text{C}$  до  $+527^\circ\text{C}$ . Пренебрегая влиянием заряженных дефектов кристаллической решётки на движение носителей заряда, рассчитайте, во сколько раз при этом меняется удельное сопротивление полупроводника.

**22.19.** При комнатной температуре чистый германий (*Ge*) имеет удельное сопротивление 0,48 Ом·м; подвижность электронов в этом материале равна  $0,38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ; подвижность дырок составляет  $0,18 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Чему равна концентрация дырок в германии в этих условиях?

**22.20.** При уменьшении температуры с удельная электропроводность чистого кремния уменьшается в 250 раз, однако при этом подвижность носителей заряда становится в 2 раза больше. Как меняется при этом их концентрация?

**22.21.** Удельная электропроводность образца кремния  $p$ - типа равна  $190 \text{ См/м}$  при постоянной Холла  $3,5 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Чему равны концентрация  $n$  и подвижность  $u$  носителей заряда в этом материале?

**22.22.** Найдите концентрацию  $n$  и подвижность  $u$  носителей заряда в полупроводнике  $n$ - типа. Известно, что после помещения пластины, изготовленной из этого материала, в магнитное поле с индукцией  $10 \text{ Тл}$  пропускание через эту пластину электрического тока силой  $1,2 \text{ мА}$  (см. рис. 22.1) ведёт к возникновению холловской разности потенциалов, равной  $7 \text{ мВ}$ . Поперечное сечение данной пластины  $a \times b = 4 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$ , удельная электропроводность материала  $94 \text{ См/м}$ . Заряды какого знака появятся на передней грани пластины?

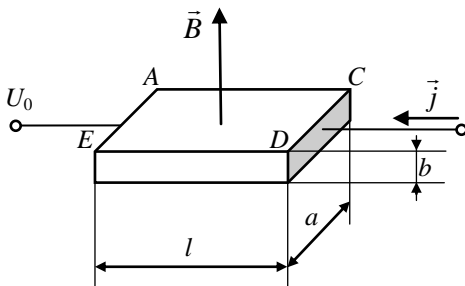


Рис. 22.1

**22.23.** Тонкая пластина шириной  $a = 10 \text{ мм}$ , изготовленная из полупроводника, легированного примесью одного типа, помещена в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,2 \text{ Тл}$  так, что вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости пластины  $ACDE$  (см. рис. 22.1). При плотности тока  $j = 0,005 \text{ А/мм}^2$  через образец холловская разность потенциалов оказалась равной  $0,386 \text{ мВ}$ , при этом передняя грань пластины приобрела положительный заряд. Полагая, что основной вклад в электропроводность дают носители заряда лишь одного типа, определите их концентрацию и то, какие энергетические уровни создаются примесями – донорные или акцепторные.

**22.24.** Чему равна подвижность носителей заряда в полупроводнике  $n$ -типа, если известно, что между передней и задней гранями пластины, изготовленной из этого материала, в магнитном поле индукцией  $0,2 \text{ Тл}$  при подаче постоянного напряжения  $U_0 = 9,4 \text{ В}$  (рис. 22.1) регистрируется холловская разность потенциалов  $1,88 \text{ мВ}$ ? Длина пластины  $l = 4 \text{ см}$ , ширина  $a = 2 \text{ см}$ .

## Тема 23.

## ПОГЛОЩЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

**23.1.** Какие количественные выводы о ширине запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника и о наличии в нём примесных центров можно сделать, если его кристаллы являются прозрачными и бесцветными в интервале длин волн от 380 нм до 780 нм?

**23.2.** Будет ли казаться прозрачным и бесцветным кристалл, имеющий ширину запрещенной зоны 3,7 эВ и содержащий донорные уровни, расположенные на 0,05 эВ ниже дна зоны проводимости, а также акцепторные уровни, находящиеся на расстоянии 0,4 эВ от потолка валентной зоны? Межпримесным поглощением пренебречь; температуру считать близкой 0 К.

**23.3.** Определите длинноволновую границу собственного и примесного поглощения полупроводника  $n$ -типа, расстояние от потолка валентной зоны до уровня Ферми в котором равно 2,9 эВ, а энергия ионизации примеси составляет 0,2 эВ. Температуру считать близкой 0 К. Рассмотреть два случая: а) образец освещается монохроматическим излучением, длину волны которого можно менять; б) освещение образца проводится одновременно в широком интервале длин волн, включающем ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучение.

**23.4.** В полупроводниковом материале с шириной запрещенной зоны 3,1 эВ имеется донорная примесь с энергией ионизации 0,2 эВ и акцепторная примесь с энергетическим уровнем, расположенным выше валентной зоны на 0,5 эВ. Изобразите возможный вид графика зависимости коэффициента поглощения этого материала от длины волны падающего на образец электромагнитного излучения, отметив по оси абсцисс характерные для данной ситуации численные значения. Переходами в донорно-акцепторных парах, внутрицентровыми переходами и поглощением излучения свободными носителями пренебречь.

**23.5.** Во сколько раз отличаются длины волн, соответствующие примесному и собственному поглощению света в полупроводнике  $n$ -типа, в котором энергетический уровень донора и валентная зона

расположены соответственно на расстояниях 0,2 эВ и 2,8 эВ от уровня Ферми? Температуру образца считать близкой к 0 К.

**23.6.** При освещении полупроводникового образца оказывается, что в нём при температуре, близкой к 0 К, поглощается излучение с длинами волн от 500 нм до 663 нм, а свет с длиной волны менее 0,5 мкм вызывает явление фотоэлектронной эмиссии. Изобразите возможную зонную схему такого материала, отметив на ней численные значения энергий (в электронвольтах), соответствующих дну зоны проводимости, потолку валентной зоны и уровню Ферми. За нулевое примите значение минимальной энергии, которую может иметь свободный электрон. Полупроводник – собственный.

**23.7.** В собственный полупроводник вводят донорную примесь, и при температуре, близкой к 0 К, уровень доноров оказывается отстоящим от уровня Ферми на 0,3 эВ. В тот же материал можно вместо донорной примеси ввести акцепторную; уровень акцепторной примеси будет находиться на расстоянии 0,2 эВ от уровня Ферми. Если же в полупроводник ввести обе примеси вместе, то в спектре его поглощения появится полоса, соответствующая длине волны 663 нм. Чему равна ширина запрещенной зоны этого полупроводника? Смещением энергетических уровней в донорно-акцепторных парах пренебречь.

**23.8.** Акцепторный уровень в полупроводнике при низкой температуре находится на расстоянии 2,4 эВ от дна зоны проводимости, уровень Ферми лежит на 2,55 эВ ниже дна зоны проводимости. Какая длина волны в спектре поглощения соответствует началу процесса образования дырок в этом полупроводнике?

**23.9.** Нарисуйте зонную схему полупроводника *n*-типа проводимости с шириной запрещенной зоны 2,7 эВ, энергия ионизации примеси в котором равна 0,5 эВ. На схеме отметьте электронные переходы, приводящие к возникновению фотопроводимости. Рассчитайте длинноволновую границу внутреннего фотоэффекта (рассмотрите два случая: а) образец освещается монохроматическим излучением, длину волны которого можно менять в видимой и ближней инфракрасной области спектра; б) падающее на образец излучение характеризуется непрерывным спектром в видимой и ближней инфракрасной области спектра). Какова возможная

окраска кристаллов данного полупроводника? Температуру считать близкой к 0 К.

**23.10.** Нарисуйте зонную схему полупроводника  $p$ -типа проводимости с шириной запрещенной зоны 2 эВ и акцепторами с глубиной залегания относительно потолка валентной зоны 0,4 эВ. Покажите электронные переходы, приводящие к возникновению фотопроводимости. Рассчитайте длинноволновую границу внутреннего фотоэффекта (рассмотрите два случая: а) образец освещается монохроматическим излучением, длину волны которого можно менять в видимой и ближней инфракрасной области спектра; б) падающее на образец излучение характеризуется непрерывным спектром в видимой и ближней инфракрасной области спектра). Какова возможная окраска кристаллов данного полупроводника? Температуру считать близкой к 0 К.

**23.11.** При освещении собственного полупроводника (температура близка 0 К) красная граница внешнего фотоэффекта оказывается равной 500 нм. Известно, что дно зоны проводимости этого полупроводника находится на расстоянии 0,6 эВ от минимального уровня энергии, соответствующей свободному электрону. Чему равна длинноволновая граница внутреннего фотоэффекта в данном материале?

**23.12.** При освещении собственного полупроводника с шириной запрещенной зоны  $E_g = 1,1$  эВ его удельное сопротивление снизилось с  $\rho_0 = 0,5$  Ом·м до  $\rho = 0,4$  Ом·м. Чему равна длинноволновая граница  $\lambda_{гр}$  внутреннего фотоэффекта для этого материала? Считая подвижности электронов и дырок в данном полупроводнике одинаковыми ( $\mu = 1250$  см<sup>2</sup>/В·с), определите концентрацию  $\Delta n$  неравновесных электронов, возникающих в полупроводнике в этих условиях.

**23.13.** Собственный полупроводник с шириной запрещенной зоны 3,4 эВ легирован примесью, которая создала центры свечения с энергетическим уровнем, расположенным на 0,7 эВ ниже положения уровня Ферми, соответствующего состоянию полупроводника до легирования. Рассчитайте наименьшую длину волны света, излучаемого при переходе электронов из зоны проводимости на

уровни центров свечения. Чем определяется положение максимума соответствующей полосы в спектре люминесценции?

**23.14.** Полупроводник *n*-типа имеет ширину запрещенной зоны, равную 3 эВ (температура близка к 0 К). При переходе электрона с уровня примеси в валентную зону испускается квант света с длиной волны 450 нм. Чему равно расстояние от дна зоны проводимости до уровня Ферми этого полупроводника?

**23.15.** Донорный уровень в полупроводнике при низкой температуре находится на 0,2 эВ ниже уровня Ферми. Ширина запрещенной зоны полупроводника 3,4 эВ. Чему равна длина волны света, излучаемого при переходе электрона с донорного уровня в валентную зону?

**23.16.** При внутрицентральной люминесценции полупроводника яркость его послесвечения за 1 мс уменьшилась в 4 раза. Во сколько раз она уменьшится: а) за 0,5 мс; б) за 3 мс?

**23.17.** Найти среднее время жизни возбужденного состояния центра свечения, если за время 1 мкс яркость связанной с ним внутрицентральной люминесценции уменьшается в 1,5 раза.

**23.18.** Полупроводник *p*-типа с шириной запрещенной зоны 3 эВ содержит примесь, которая создаёт центры свечения с энергетическим уровнем, расположенным на расстоянии 0,9 эВ до ближайшей зоны. Для возбуждения фотолюминесценции полупроводник подвергается засветке ультрафиолетовым излучением, энергия квантов которого позволяет перевести электроны из валентной зоны в зону проводимости. Люминесценция возникает, когда электрон, испуская квант света, переходит из зоны проводимости на уровень примеси (далее с уровня примеси электроны возвращаются в валентную зону, теряя энергию уже в виде тепла). Полагая, что только каждый второй квант ультрафиолетового излучения приводит к фотовозбуждению электронов, оцените к.п.д. (энергетический выход) фотолюминесценции.

**23.19.** Энергетический выход (к.п.д) фотолюминесценции собственного полупроводника с шириной запрещённой зоны 1,5 эВ равен 0,4. Чему равно отношение числа испускаемых при люминесценции фотонов к числу фотонов, поглощенных за то же время при освещении образца светом с длиной волны 313 нм?



**23.20.** Полупроводниковый лазер, работающий по трехуровневой схеме, имеет к.п.д. 0,8 и излучает на длине волны 640 нм. Определите длину волны света, используемого для накачки данного лазера, и изобразите схему энергетических уровней (за ноль принять энергию уровня, соответствующего основному состоянию электронов). Известно, что каждый поглощенный фотон при возбуждении системы приводит к появлению одного кванта вынужденного излучения.

**23.21.** Время жизни электрона на энергетическом уровне с энергией  $E_1$  составляет  $10^{-8}$  с, на уровне с энергией  $E_2$  оно равно  $10^{-5}$  с и на уровне с энергией  $E_3$  это время – 1 мс. Как на энергетической схеме должны располагаться эти уровни с тем, чтобы в системе можно было получить вынужденное излучение?

**23.22.** Изобразите энергетическую схему рубинового лазера и рассчитайте его к.п.д. Известно, что при накачке лазера светом с длиной волны 550 нм он излучает на длине волны 694,3 нм. При построении схемы за ноль принять энергию уровня, соответствующего низшему энергетическому состоянию электронов. Считать, что каждый поглощенный квант энергии при возбуждении данной системы приводит к появлению кванта энергии вынужденного излучения.

**23.23.** Если полупроводниковый диод включить в прямом направлении, подав на него напряжение  $+U_1$ , ток через него оказывается равным 50 мкА. Если на диод подать запирающее напряжение  $-U_1$ , ток составит 1 мкА. Какой ток будет идти через диод при подаче на него напряжения  $U_2 = +2U_1$ ?

**23.24.** Напряжение на  $p$ – $n$ -переходе полупроводникового диода, находящегося при температуре  $+17^\circ\text{C}$ , меняют с  $+0,18$  В до  $-0,1$  В. Во сколько раз при этом изменяется электрическое сопротивление перехода?

**23.25.** Чему равно электрическое сопротивление  $p$ – $n$ -перехода при температуре 331 К и постоянном напряжении  $U$ , если при температуре 290 К при том же напряжении его сопротивление составляет 50 Ом? Расчёты выполните для двух случаев: а)  $U = 2$  мВ; б)  $U = 200$  мВ.

**23.26.** Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить напряжение  $U = 0,02$  В (так, чтобы на  $p$ -область подавался положительный потенциал), через переход будет идти ток  $I$ . При увеличении напряжения в два раза сила тока возрастает в три раза. При какой температуре  $T$  работает  $p$ - $n$ -переход?

**23.27.** Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить напряжение  $U_1$  так, чтобы на  $n$ -область подавался отрицательный потенциал, через переход будет идти ток 10 мА. При подаче напряжения  $U_2 = 2U_1$  сила тока возрастает в десять раз. Известно также, что при приложении к  $p$ - $n$ -переходу напряжения  $-U_1$  сила тока  $I$  через переход будет практически такой же, как и в случае, когда на переход подаётся напряжение  $-U_2$ . Вычислите, чему равна сила тока  $I$ .

**23.28.** Если на  $p$ - $n$ -переход подать напряжение  $U_1$ , сила тока через него окажется равной 10 мкА; при этом увеличение напряжения в два раза (при той же полярности) не приводит к заметному изменению сила тока через переход. При подаче на  $p$ - $n$ -переход напряжения другой полярности  $U_2$  или  $U_3$  токи составят 10 мА и 100 мА соответственно. Чему равно отношение  $U_3 / U_2$ ?

## Тема 24.

## АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

**24.1.** Отношение массы электронной оболочки к массе нуклонов, входящих в состав ядра, равно примерно  $2,725 \times 10^{-4}$ . Каких частиц в ядре больше: протонов или нейтронов? Считать  $m_e \approx 9,1 \times 10^{-31}$  кг,  $m_p \approx m_n \approx 1,67 \times 10^{-27}$  кг, где  $m_e$  – масса электрона,  $m_p$  и  $m_n$  – массы протона и нейтрона соответственно.

**24.2.** Суммарная масса нейтронов в ядре нейтрального атома в 1,8 раза меньше суммарной массы всех нуклонов в ядре. Чётное или нечётное число электронов содержит атом? В расчётах принять  $m_p \approx m_n$ , где  $m_p$  и  $m_n$  – массы протона и нейтрона соответственно.

**24.3.** Для получения изотопов  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ , используемых в качестве ядерного топлива, используются «сырьевые» ядра, которые подвергают облучению нейтронами. Вследствие захвата нейтрона ядром «сырья» рождается новое ядро, которое является неустойчивым и распадается, испуская  $\beta^-$ -частицу. Возникающее при этом ядро также неустойчиво и тоже распадается, испуская  $\beta^-$ -частицу, после чего и рождается изотоп  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ . Какие изотопы используются в качестве «сырьевых»?

**24.4.** После ряда радиоактивных превращений из изотопов тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  образуются ядра свинца  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . Сколько  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов при этом происходит?

**24.5.** Вследствие радиоактивных распадов  ${}^{238}_{92}\text{U}$  превращается в  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . Сколько при этом происходит  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -распадов?

**24.6.** За три года начальное количество ядер радиоактивного изотопа уменьшилось в 64 раза. Определите, во сколько раз оно уменьшилось за 1 год.

**24.7.** Период полураспада некоторого радиоактивного изотопа равен 10 мин. Определите, за какое время распадается 75% от начального количества атомов этого элемента.

**24.8.** В светящийся состав для циферблата часов добавлен изотоп прометия  ${}^{147}_{61}\text{Pm}$ , испытывающего  $\beta$ -распад с периодом полураспада 2,5 года. Испускаемые при распаде электроны возбуждают люминофор, который начинает излучать свет; яркость свечения пропорциональна числу таких электронов. Вычислите, за какое время яркость люминесценции светящегося состава уменьшается в три раза.

**24.9.** В герметичный сосуд, имеющий объём 4,14 л, при температуре 300 К и давлении  $10^5$  Па введен радиоактивный газ тритий (один из изотопов водорода), который имеет период полураспада 12,3 года. Сколько ядер атомов трития из находящихся в сосуде распадется за 28,5 лет?

**24.10.** Энергия связи ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  равна 28,4 МэВ. Найти массу нейтрального атома гелия. Масса покоя протона равна  $1,67265 \times 10^{-27}$  кг, масса покоя нейтрона  $1,67495 \times 10^{-27}$  кг; масса покоя электрона  $9,1 \times 10^{-31}$  кг.

**24.11.** При отрыве нейтрона от ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  образуется ядро  ${}^3_2\text{He}$ . Какую работу необходимо для этого совершить? Массы нейтральных атомов  ${}^4_2\text{He}$  и  ${}^3_2\text{He}$  соответственно равны  $6,6467 \times 10^{-27}$  кг и  $5,0084 \times 10^{-27}$  кг.

**24.12.** Определите удельную энергию связи  $E_{\text{св}}/A$  для следующих ядер: а)  ${}^4_2\text{He}$ ; б)  ${}^{12}_6\text{C}$ . Массы нейтральных атомов гелия и углерода соответственно равны  $6,6467 \times 10^{-27}$  кг и  $19,9272 \times 10^{-27}$  кг.

**24.13.** Найти минимальную энергию и соответствующую этой энергии длину волны  $\gamma$ -кванта, способного при столкновении заставить разделиться ядро дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (масса которого равна  $3,34461 \times 10^{-27}$  кг) на протон (масса  $1,67265 \times 10^{-27}$  кг) и нейтрон (масса  $1,67495 \times 10^{-27}$  кг).

**24.14.** Найти минимальную кинетическую энергию и импульс протона, способного при столкновении «разбить» ядро дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (масса  $3,34461 \times 10^{-27}$  кг) на протон (масса  $1,67265 \times 10^{-27}$  кг) и нейтрон (масса  $1,67495 \times 10^{-27}$  кг).

**24.15.** Определите энергию, выделяющуюся в результате ядерной реакции:  ${}_{12}^{23}\text{Mg} \rightarrow {}_{11}^{23}\text{Na} + {}_1^0e + {}_0^0\nu_e$ . Массы нейтральных атомов магния и натрия соответственно равны  $3,8184 \times 10^{-26}$  кг и  $3,8177 \times 10^{-26}$  кг, масса позитрона  ${}_1^0e$  равна массе электрона, то есть  $9,1 \times 10^{-31}$  кг; массой электронного нейтрино  $\nu_e$  можно пренебречь.

**24.16.** В ядерной реакции  ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + n$  выделяется энергия 3,27 МэВ. Определите массу ядра  ${}_2^3\text{He}$ , если масса ядра  ${}_1^2\text{H}$  равна  $3,34461 \times 10^{-27}$  кг.

**24.17.** Поглощается или выделяется энергия в ядерной реакции  ${}_3^7\text{Li} + p \rightarrow 2 {}_2^4\text{He}$ ? Определите величину соответствующей энергии. Удельная энергия связи ядра  ${}_3^7\text{Li}$  равна 5,9 МэВ, у ядра  ${}_2^4\text{He}$  она составляет 7,06 МэВ.

**24.18.** Определите, является ли ядерная реакция  ${}_3^7\text{Li} + p \rightarrow {}_4^7\text{Be} + n$  экзотермической или эндотермической. Рассчитайте величину соответствующей энергии. Удельная энергия связи изотопа  ${}_3^7\text{Li}$  равна 5,9 МэВ, у ядра  ${}_4^7\text{Be}$  она составляет 5,7 МэВ.

**24.19.** При столкновении позитрона и электрона происходит их аннигиляция, в результате которой электронно-позитронная пара превращается в два фотона. Определите энергию каждого из возникших фотонов, полагая, что кинетическая энергия электрона и позитрона до их столкновения была пренебрежимо мала.

**24.20.** В результате осуществления реакции  $h\nu \rightarrow {}_1^0e + {}_{-1}^0e$  суммарная кинетическая энергия позитрона и электрона в момент их возникновения оказывается равной 1 МэВ. Определите энергию  $E$  и длину волны  $\lambda$  фотона, порождающего эти элементарные частицы.

**24.21.** Частица и античастица, имеющие противоположные электрические заряды, притягиваются друг к другу: в результате происходит их аннигиляция, которая приводит к рождению двух  $\gamma$ -квантов с энергией 941 МэВ у каждого. Полагая, что кинетическая

энергия аннигилировавших объектов до столкновения была пренебрежимо малой, определите, о каких частицах идёт речь.

**24.22.** При какой скорости движения электрона его кинетическая энергия будет равна энергии покоя?

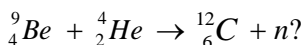
**24.23.** Принимая, что полная энергия релятивистских мюонов в космическом излучении составляет 3 ГэВ, определите расстояние  $l$ , проходимое мюонами за время их жизни, если собственное время жизни мюона равно 2,2 мкс, а энергия покоя 100 МэВ.

**24.24.** Во сколько раз отличаются скорости электрона  $v_e$  и протона  $v_p$ , имеющих одинаковую кинетическую энергию 1 МэВ?

**24.25.** Какую работу необходимо совершить с тем, чтобы увеличить скорость электрона с 0,6с до 0,8с (здесь  $c$  – скорость света в вакууме)?

**24.26.** Сколько нейтронов и протонов находится в 1 г воды?

**24.27.** Какую массу воды  $M$  можно нагреть от 0 °С до кипения, если использовать всё тепло, которое выделяется при распаде 1 г бериллия  ${}^9_4\text{Be}$  в следующей ядерной реакции:



Массы нейтральных атомов  ${}^9_4\text{Be}$ ,  ${}^4_2\text{He}$  и  ${}^{12}_6\text{C}$  равны 9,01219 а. е. м., 4,00260 а. е. м. и 12,00000 а. е. м соответственно, масса нейтрона 1,00867 а. е. м. Удельная теплоемкость воды равна 4190 Дж/(кг·К).

**24.28.** Тепло, выделяющееся в ходе ядерной реакции на электростанции, идёт на нагрев пара, который, приводит в действие турбину, вращающую ротор генератора электрической энергии. Определите к.п.д. ядерного блока, если за сутки реактор расходует 534 г урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  при вырабатываемой электрической мощности 200 МВт. Деление одного ядра урана сопровождается выделением энергии в 200 МэВ.

# ОТВЕТЫ

## Тема 1.

## Кинематика

1.1.  $-1 \text{ м/с}$

1.3.  $10 \text{ м/с};$   
 $5 \text{ м/с}^2$

1.7.  $43,2 \text{ км/ч}$

1.9.  $36 \text{ км/ч}$

1.11.  $a_1 \approx 0,056 \text{ м/с}^2$

1.13.  $120 \text{ м}$

1.15. Через  $t \approx 12,6 \text{ с}$

1.17. а)  $2,45 \text{ м};$  б)  $0$

1.19. а)  $\tau = \frac{v_0 \sin \alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2gH}}{g} =$   
 $= 3 \text{ с};$

б)  $L = \tau v_0 \cos \alpha = 39,5 \text{ м};$

в)  $v = \sqrt{v_0^2 + 2gH} = 25,8 \text{ м/с};$

г)  $\varphi = 59^\circ 47';$

д)  $H_{\text{MAX}} = H + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = 25,4 \text{ м}$

1.2. а)  $6 \text{ м};$

б)  $10 \text{ м}$

1.4.  $27 \text{ м/с} = 97,2 \text{ км/ч}$

1.6. а)  $115 \text{ м};$

б) в  $2,8$  раза

1.8. Через  $12 \text{ с};$

$21,6 \text{ км/ч}$

1.10. Догонит

1.12.  $12 \text{ м}$

1.14.  $200 \text{ м}$

1.18.  $22,9 \text{ м/с}$

1.20.  $2,87 \text{ м};$  на нисходящем участке траектории

1.22.  $a_T = \frac{g}{\sqrt{\frac{v^2}{g^2 t^2} + 1}} = 9,3 \text{ м/с}^2;$

$R = (v^2 + g^2 t^2) / \sqrt{g^2 - a_0^2} \approx$   
 $\approx 305,5 \text{ м}$

1.24.  $70$  оборотов

1.26.  $12 \text{ с}$

1.28.  $a_n \approx 16,95 \text{ м/с}^2$

1.23. В  $20$  раз

1.27. а)  $2 \text{ м/с};$

б)  $a_n = 8 \text{ м/с}^2; a_T = 1,5 \text{ м/с}^2;$   
 $a = 8,14 \text{ м/с}^2;$

в)  $100^\circ 26'$

1.29.  $a_n / a_T = 2h/R = 60$

1.30.  $a_n \approx 0,014 \text{ м/с}^2$

**Тема 2.****Динамика поступательного движения**

- 2.1.  $20 \text{ м/с}^2$
- 2.2.  $71 \text{ Н}$
- 2.5.  $16$
- 2.4.  $16,0 \text{ т}$
- 2.6.  $L \approx 4 \text{ км}$
- 2.7.  $x = \frac{(m_1 + m_2)(g - a)}{k} \approx 8,8 \text{ мм}$
- 2.8.  $0,0315 \text{ рад} \approx 1^\circ 48'$
- 2.9.  $\mu = tg\beta - \frac{m_1 g(\mu_1 \cos \alpha + \sin \alpha) + a(m + m_1 + m_2)}{m_2 g \cos \beta} \approx 0,41$ , где  $a = 2S/t^2$
- 2.10.  $a = \frac{g[\sin \alpha(m_1 + m_2) - \cos \alpha(\mu_1 m_1 + \mu_2 m_2)]}{m_1 + m_2} \approx 4,6 \text{ м/с}^2$
- 2.11.  $3,2 \text{ м/с}^2$ ;  
 $1,5 \text{ м/с}^2$
- 2.12.  $4,9 \text{ м/с}^2$
- 2.13.  $0,051 \text{ рад} \approx 2^\circ 55'$
- 2.14.  $2 \text{ с}$
- 2.15.  $t = \frac{v_0}{g\sqrt{\sin^2 \alpha - \mu^2 \cos^2 \alpha}} = 3 \text{ с}$
- 2.16.  $0,27$
- 2.17.  $100 \text{ км/час}$
- 2.18.  $11,9 \text{ см}$
- 2.19. Через  $1,4 \text{ с}$
- 2.20.  $T = \sqrt{\frac{3\pi(R + H)^3}{GR^3\rho}} \approx 1 \text{ час } 33 \text{ мин } 19 \text{ с}$
- 2.21.  $5,4 \text{ км/с}$
- 2.22.  $2,6 \cdot 10^3 \text{ км}$
- 2.23. В  $1,5$  раза
- 2.24.  $8,5 \cdot 10^{-14} \text{ Н}$
- 2.25.  $F_0 = G \frac{mM}{l^2} \frac{2\sqrt{3}}{3} = 3,9 \cdot 10^{-14} \text{ Н}$ ;
- 2.26.  $11,7 \text{ Н}$
- $F_\infty = 2F_0$
- 2.27.  $60 \text{ Н}$ ;  $0,04 \text{ м/с}^2$
- 2.28.  $0,92 \text{ Н}$
- 2.29.  $T = Sl[g(\rho - \frac{3}{4}\rho_0) + \rho a] \approx 1875,4 \text{ Н}$
- 2.30. Через  $40 \text{ с}$
- 2.31.  $3,85 \text{ м/с}^2$ ;  $23,24 \text{ Н}$



### Тема 3.

### Динамика вращательного движения. Законы сохранения в механике

- 3.1. а)  $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
б)  $203,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
в)  $307,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;
- 3.3.  $I = 4ml^2/3 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- 3.5.  $I = 11MR^2/2 = 41,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- 3.7. 157 Н
- 3.9.  $M = \pi m R^2 f / t \approx 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- 3.11.  $1,12 \text{ м/с}^2$ ;  $2,52 \text{ Н}$
- 3.13.  $0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- 3.15.  $0,78 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- 3.17.  $723 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$
- 3.19. Увеличится в 1,33 раза
- 3.21.  $T = \frac{2\pi l}{v} \cdot \frac{2R^2 + 5(R+L)^2}{2R^2 + 5(R+l)^2} = 6,64 \text{ с}$
- 3.23.  $14,1 \text{ м/с}$
- 3.25.  $u = \frac{\sqrt{2m}\nu}{\sqrt{M(m+M)}} \approx 11,55 \text{ м/с}$
- 3.27. а)  $98,1 \text{ Дж}$ ; б)  $3,1 \cdot 10^7 \text{ Дж}$
- 3.29. Уменьшится в 4 раза
- 3.31.  $6,25 \text{ МВт}$
- 3.33.  $8,6 \cdot 10^5 \text{ Вт}$
- 3.35.  $H = \frac{2Mh}{m+M} = 4 \text{ м}$
- 3.37. 10 оборотов
- 3.39.  $v = 2 \frac{m+M}{m} \sqrt{gl} = 5,6 \text{ м/с}$
- 3.2.  $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- 3.4.  $I = 0,13 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- 3.6.  $31,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- 3.8.  $M = 11\epsilon ml^2/60 = 0,021 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- 3.10.  $36 \text{ рад/с}$ ;  $648 \text{ м/с}^2$
- 3.12.  $F = \ddot{\phi} R(M+m)/\sin\alpha = 2,04 \text{ Н}$
- 3.14.  $\Omega = \frac{Ml^2\omega - 12m\nu h}{Ml^2 + 12mh^2} = 16,68 \text{ рад/с}$ ;  
в сторону, противоположную  
начальной угловой скорости
- 3.16. 40,5
- 3.18. а)  $0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ ; б)  $0,28 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$
- 3.20.  $0,75 \text{ рад/с}$
- 3.22.  $13,3 \text{ м/с}$
- 3.24. а)  $4,4 \text{ м/с}$ ;  
б)  $2 \text{ м/с}$ ;  
в)  $3,42 \text{ м/с}$
- 3.26.  $128 \text{ Дж}$
- 3.28. 0,2
- 3.30.  $810 \text{ Дж}$
- 3.32.  $3,9 \cdot 10^6 \text{ Вт}$
- 3.34.  $h = \frac{\sin\alpha}{2} \cdot \frac{v^2 - 2\mu gS}{g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)} = 2,3 \text{ м}$
- 3.36.  $h_{\text{ОБР}} : h_{\text{ДИСК}} : h_{\text{ШАР}} : h_{\text{ТОЧК}} = 20 : 15 : 14 : 10$
- 3.38.  $19,62 \text{ Н}$

**Тема 4.****Электростатика. Электрическое поле**

- 4.1. В  $2,0 \cdot 10^{21}$  раз  
4.3.  $1,0 \cdot 10^{-15}$  Н  
4.5. Выше в точке Y  
4.7.  $1,0 \cdot 10^{-12}$  Кл  
4.9.  $1,7 \cdot 10^4$  В/м  
4.11.  $5,5 \cdot 10^9$  м<sup>-2</sup>  
4.13.  $1,9 \cdot 10^7$  В·м  
4.15. а) 3,1 В/м;  
б)  $1,6 \cdot 10^{-2}$  В  
4.17. 51 В  
4.19.  $D = A\epsilon_0/(el) = 3,0 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>  
4.21. 9 м  
4.23.  $\nu = \sqrt{\frac{\tau e}{\pi \epsilon_0 m} \ln \frac{R}{d/2}} = 7,6 \cdot 10^5$  м/с  
4.2.  $5,1 \cdot 10^{17}$  м/с<sup>2</sup>  
4.4.  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Кл  
4.6.  $Q = \sqrt{3} q = 17,3$  нКл  
4.8. 81 В/м  
4.10.  $9,7 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>  
4.12. 45°  
4.14.  $k = \epsilon_0 \Phi^2 / [16\pi x(l+x)^2] =$   
 $= 110$  Н/м  
4.16. 28 В/м  
4.18. 6 Дж  
4.20.  $W_K = 13,6$  эВ;  
 $W_{II} = -27,2$  эВ;  
 $E = -13,6$  эВ  
4.22. 1,3 см  
4.24.  $A = \frac{q_1 q_2 + q_1 q_2 + q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 a} =$   
 $= 1,0 \cdot 10^{-9}$  Дж  
4.26.  $6,4 \cdot 10^{-23}$  Дж

## Тема 5.

## Проводники в электрическом поле. Электрические конденсаторы

5.1.  $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

5.3.  $\varphi \sim 1/\sqrt[3]{Const + t}$

5.5. Увеличится в 9 раз

5.7.  $2 \text{ мкФ};$   
 $1,2 \text{ мкФ};$   
 $1,75 \text{ мкФ}$

5.9.  $40 \text{ В}$

5.11.  $6 \text{ В}$

5.13.  $q = \frac{C_1 C_2 U (C_1 + 2C_2)}{(C_1 + C_2)^2} =$   
 $= 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$

5.15. а)  $q_{\text{ПОСЛЕ}} = 2q_{\text{ДО}};$   
б)  $q_{\text{ПОСЛЕ}} = 1,5q_{\text{ДО}}$

5.19.  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$

5.21. Минимальна в случае б)

5.23.  $1 \text{ см}$

5.25.  $2,36 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$

5.2.  $1,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$

5.4.  $C = \frac{3\epsilon\epsilon_0 \pi D^4}{8d^3} = 140 \text{ пФ}$

5.6.  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м};$   
 $Q_3 = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Кл};$   
 $\varphi = 6,4 \cdot 10^8 \text{ В}$

5.8. а)  $C_{\text{ДО}} = C_{\text{ПОСЛЕ}};$   
б)  $C_{\text{ДО}}/C_{\text{ПОСЛЕ}} = 45/32$

5.12.  $\Delta q = \frac{C_1 C_2 U}{C_1 + C_2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$

5.14. а)  $U_{\text{ДО}} = 2U_{\text{ПОСЛЕ}};$   
б)  $U_{\text{ДО}} = 1,5U_{\text{ПОСЛЕ}}$

5.18.  $250 \text{ В}$

5.20.  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$

5.22.  $E = \sqrt{\frac{2\rho W}{\epsilon\epsilon_0 m}} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ В/м}$

5.24. Уменьшится в 4 раза

## Тема 6.

## Постоянный электрический ток

- 6.1.** На 7 частей  
**6.3.** Меди по массе нужно в 2 раза больше  
**6.5.** 30 мА  
**6.7.** Сопротивление шунта нужно уменьшить в 2 раза  
**6.9.** 30 мВ  
**6.11.** а) 10,8 мА;  
б) 29,6 мА;  
в) 12,7 мА  
**6.13.** 200 Ом  
**6.15.**  $\nu_d = jV/(eN) = 7,8 \cdot 10^{-4}$  м/с;  
 $\nu_{кв}/\nu_d = 3,2 \cdot 10^8$   
**6.17.**  $5,0 \cdot 10^{18}$  электронов  
**6.19.** 3,6 Кл; 121 Дж  
**6.21.** Напряжение нужно повысить в 2 раза  
**6.23.**  $P = P_{\text{MAX}}$  при  $R = r$ ;  
в точке перегиба графика  
 $R = 2r$   
**6.2.**  $R_{\text{ц}} > R_{\text{к}}$   
**6.4.**  $1,7 \cdot 10^{-2}$  Ом  
**6.6.** 18 мА  
**6.10.** 18 мВ  
**6.12.** а) 7,18 В;  
б) 21,8 В;  
в) 22,2 В  
**6.14.** 0,2 А  
**6.16.**  $1,4 \cdot 10^{-2}$  В/м  
**6.18.** а)  $\rho = 2t/(\epsilon \epsilon_0) = 4,5 \cdot 10^{13}$  Ом·м;  
б)  $\rho = t/(\epsilon \epsilon_0 \ln 2) = 3,3 \cdot 10^{13}$  Ом·м  
**6.20.**  $2,9 \cdot 10^3$  В  
**6.22.**  $R = (U_0 - 2U)R_0/(3U) = 1,13$  Ом  
**6.24.** 50 %

## Тема 7.

## Магнитное поле. Силы в магнитном поле

7.1. а)  $0,3 \cdot 10^4$  А;  
б)  $1,0 \cdot 10^7$  А

7.3. а) 1 : 2;  
б) 1 : 2;  
в) 3 : 2;  
г) 1 : 2

7.5.  $1,4 \cdot 10^{-7}$  Тл

7.9. 93,4 А

7.11.  $p = \mu_0(N/l)^2 I^2 = 0,05$  Па

7.13.  $2,0 \cdot 10^{-7}$  Н

7.15.  $1,0 \cdot 10^{-4}$  Дж

7.17.  $B \cdot 4/\pi \approx 1,3$  раза

7.21.  $R = 5$  мм

7.23. а)  $1,0 \cdot 10^7$  м/с;  
б)  $1,96 \cdot 10^3$  А/м

7.25.  $R = 1,25 \cdot 10^{-3}$  м;  
 $h = 13,6 \cdot 10^{-3}$  м

7.27.  $1,5 \cdot 10^{-11}$  Тл

7.29.  $x = \frac{Bl^2}{2} \sqrt{\frac{e}{2mU}} \approx 2,4 \cdot 10^{-3}$  м

7.31. а)  $3,1 \cdot 10^{-3}$  Дж

7.33. 0,29 Дж

7.2. а)  $2,0 \cdot 10^{-7}$  Тл;  
б)  $4,4 \cdot 10^{-7}$  Тл;  
в)  $1,0 \cdot 10^{-6}$  Тл;  
г)  $3,6 \cdot 10^{-7}$  Тл

7.4.  $B = \frac{4\mu_0 \rho}{R(R+r)d^2} E \approx 3,0 \cdot 10^{-6}$  Тл

7.6. 40 мТл

7.8.  $B \approx 4,14 \cdot 10^{-7}$  Тл

7.10. 2,4 Н

7.12. 91,8 Н

7.16.  $p_m = \sqrt{2} Il^2 / (16\pi) \approx 0,18$  А·м<sup>2</sup>

7.18.  $1,6 \cdot 10^{-4}$  Н·м

7.20.  $2,75 \cdot 10^{-2}$  Тл

7.22. 534,4 В

7.24.  $1,0 \cdot 10^6$  м/с

7.26.  $T = 2\pi W / (qBc^2) \approx 0,13$  мкс

7.28.  $6,0 \cdot 10^6$  В

7.30.  $3,4 \cdot 10^{-4}$  Дж

7.32. 3,7 Дж

**Тема 8.****Магнитное поле в веществе.**  
**Электромагнетизм**

**8.3.** а) 239;  
б) 1000 А/м

**8.5.** 0,1131 Тл

**8.9.** 74,4 мВб

**8.11.** 0,019 мВ

**8.13.** 60 км/ч

**8.17.**  $m = \frac{4\pi\rho_1\rho_2q}{\mu_0 H} = 0,019 \text{ кг}$

**8.19.** а) 0,3 А;  
б) 2 В

**8.21.**  $L = \frac{\mu_0 RD}{8\rho} \sqrt{\pi S} = 44 \text{ мкГн}$

**8.23.**  $L = \frac{Rt}{\ln\left(\frac{E}{E - IR}\right)} = 70 \text{ мГн}$

**8.25.** 0,06 А

**8.27.** 0,9 Тл

**8.29.** 6 Ом

**8.31.** 0,035 В/м

**8.4.** -10,34 А/м

**8.8.**  $J = -1 \text{ А/м}$

**8.10.** 1,9 В

**8.12.** а) 35,5 В;  
б) 17,8 В;  
в) 71,1 В

**8.16.** 750 мкВ

**8.18.** 1 В

**8.20.** 0,45 мГн;  
0,189 Гн

**8.22.**  $U = 13,32 \sin(100\pi t - \pi/4) \text{ В}$

**8.24.** 62,5 мДж

**8.26.** 0,72

**8.28.** 0,05 А

**8.30.** 2,5 В

## Тема 9.

## Свободные колебания

**9.3.** Через  $8/3 \text{ с} \approx 2,67 \text{ с}$

**9.5.**  $E_{\text{полн}} = 50\pi^2 \text{ мкДж} \approx 0,5 \text{ мДж}$

**9.7.**  $F = \sqrt{2} \pi \cdot 10^{-3} \cos(\pi t) \text{ Н}$

**9.13.**  $5 \text{ с}$

**9.15.**  $2,2 \text{ с}$

**9.17.**  $H = R_3(1 - T_1^2/T_2^2) \approx 2,6 \text{ км}$

**9.19.**  $U = 0,2 \sin(1000t) \text{ В}$

**9.21.**  $e^2 \approx 7,4$

**9.23.**  $528,7 \text{ с}$

**9.25.**  $\theta = \frac{2\pi \ln \Delta}{t \sqrt{\frac{g}{l} - \frac{\ln^2 \Delta}{t^2}}} \approx 0,048$

**9.27.**  $0,34 \text{ с}^{-1}$

**9.29.**  $4,5 \text{ с}$

**9.31.**  $U = 266,67e^{-200t} - 66,67e^{-800t} \text{ В}$

**9.33.**  $189$

**9.4.**  $x = 0,6 \cdot \sin(\pi t/2) \text{ м}$

**9.6.**  $a = 2\pi \cdot \cos(100\pi t) \text{ м/с}^2$

**9.12.**  $\sqrt{9,8}/2\pi \approx 0,5 \text{ Гц}$

**9.14.**  $0,6 \text{ с}$

**9.16.**  $128 \text{ км}$

**9.18.**  $I = \sin(125000t) \text{ А}$

**9.20.** а)  $0,1$ ; б)  $0,01$ ; в)  $314$ ; г)  $e^2 \approx 7,4$

**9.22.**  $N \geq \frac{2L \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}{2\pi R} = 1,11;$

следовательно,  $N = 2$

**9.24.**  $0,6 \text{ с}^{-1}$

**9.26.**  $\beta \approx 0,2 \text{ с}^{-1};$   
 $\theta \approx 0,4;$   
 $N_e \geq 3$

**9.28.**  $60,2 \text{ с}$

**9.30.**  $U = 200e^{-5t} \cos(400t) \text{ В}$

**9.32.**  $5 \text{ с}$

## Тема 10.

## Вынужденные колебания. Сложение колебаний. Волны

- 10.1.** 23,88 м/с  $\approx$  86 км/ч  
**10.3.** 0,29 Гц  
**10.5.**  $3\pi/4 + \pi n$ , где  $n$  - целое

**10.2.** 5,7 %

**10.4.** 2 см

**10.6.**  $A = 1,49$  дм;

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{7\sqrt{3} + 8\sqrt{2}}{7 + 8\sqrt{2}} \approx$$

$$\approx 52^\circ \approx 0,9 \text{ рад}$$

**10.7.**  $\pi/6 + \pi n$ , где  $n$  - целое

**10.9.**  $\pm 2\pi/3$

**10.11.**  $x_{\text{рез}} = -(0,28/\pi^2)\sin(\pi t/2)$  м

**10.10.**  $x_{\text{рез}} = (2,1/\pi)\sin(\pi t/3)$  м

**10.12.**  $x^2/4 + y^2/9 = 1$ ; движение по часовой стрелке

**10.13.**  $x^2/4 + y^2/9 = 1$ ; движение по часовой стрелке

**10.14.**  $F = 5 \cdot 10^{-4} \sin(\pi t/2)$  Н;  
 $E_{\text{полн}} = 5 \cdot 10^{-5} / \pi^2$  Дж

**10.15.**  $x^2/\pi^{-2} + y^2/\pi^{-4} = 1$ ; движение против часовой стрелки

**10.16.**  $\pm \pi/2$

**10.17.**  $\pi/6$

**10.20.** 600 м

**10.21.** 25

**10.22.**  $\xi \approx 0,38$  мм;  
 $v \approx 6,2$  мм/с;  
 $a \approx 3,8$  мм/с<sup>2</sup>

**10.23.** 2073 мм

**10.24.** 2,5 кГц

**10.25.**  $\pi/2$



## Тема 11.

## Интерференция волн

**11.1.** Максимум

**11.3.**  $\pi$

**11.5.** В 1,5 раза

**11.7.** В 1,5 раза

**11.9.** 4

**11.11.** 
$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)^2}} \approx 1,13$$

**11.13.** 500 нм

**11.15.** 0,832

**11.17.**  $m_1 = 9k + 5;$

$m_2 = 5k + 3,$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

**11.19.** 680 нм

**11.21.** В оранжевый

**11.23.** 1,5

**11.25.** 235 нм

**11.2.** Минимум

**11.4.** Да

**11.6.** 11 мм

**11.8.**  $0,0015 \text{ рад} \approx 0,086^\circ \approx 5'10''$

**11.10.** 5,4 мм; 0

**11.12.** 0

**11.14.** 
$$\frac{r_m}{r_{m+1}} = \sqrt{\frac{m}{m+1}} = \sqrt{\frac{3}{4}};$$

$$\lambda = \frac{r_3^2}{3R} = 567 \text{ нм}$$

**11.16.** 1,64 мм

**11.18.** Уменьшится в 1,1 раза

**11.20.** 1,5

**11.22.** 
$$d = \frac{\lambda}{4n_1} = 100 \text{ нм}$$

**11.24.** 
$$d_{\min} = \frac{\lambda_{\max}}{2n_1} = 260 \text{ нм}$$

## Тема 12.

## Дифракция волн

**12.1.** 25 зон

**12.3.**  $\Delta b = \frac{d^2}{24\lambda} = 0,75 \text{ м}$

**12.5.** Нет, нельзя:  $\lambda = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

**12.7.** 0,5 м

**12.11.**  $k = \pm \frac{1}{2} \left( \frac{2d \sin \varphi}{\lambda} - 1 \right) = \pm 5$

**12.13.** Дифракционный максимум

**12.15.** 12500

**12.17.** 0,  $\pm 1$  и 0,  $\pm 1 \pm 2$ ,  $\pm 3$

**12.19.** 9

**12.21.** Видимый свет в этот диапазон не входит

**12.2.** На 5 мм

**12.4.** Светлое пятно

**12.6.** Амплитуда сигнала уменьшается в 2 раза, интенсивность – в 4 раза

**12.8.** В 2 раза

**12.10.** 0,002 м

**12.12.** В 1,8 раза

**12.16.** а) 9  
б) 5

**12.18.** 24 см

**12.20.** 390 нм

**12.22.** 0,45 нм

**12.24.**  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{3}{6} = \frac{\pi}{3}$

**12.25.** 1

### Тема 13.

### Поляризация света. Поглощение и рассеяние света. Явление дисперсии

13.1.  $34^\circ$

13.3. Из среды с  $n_1 = 1,4$  в среду с  $n_1 = 1,6$   $\alpha_b \approx 49^\circ$ , полного внутреннего отражения нет; из среды с  $n_1 = 1,6$  в среду с  $n_1 = 1,4$   $\alpha_b \approx 41^\circ$ ,  $\alpha_{\text{ГР}} \approx 61^\circ$

13.5. 1,33

13.7.  $2,26 \cdot 10^8$  м/с

13.9. На 55 %

13.11. 0,33

13.13. 4 : 3

13.15. 2 см

13.17. 0,79 м

13.19. В 2,1 раза

13.2.  $x = \frac{nR}{\sqrt{1+n^2}} = 2,5$  см

13.4. Полное внутреннее отражение наблюдать нельзя

13.6. 400 нм;  
 $1,73 \cdot 10^8$  м/с

13.8.  $60^\circ$

13.10.  $\frac{I_0}{I} = \frac{2}{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\cos^2\varphi} = 12,5$

13.12. На 85 %

13.14. В 1,5 раза

13.16. В 1,35 раза

13.18. 1 м

13.20.  $\frac{I_0}{I} =$

$$= \exp \left\{ \frac{5d\alpha}{\sqrt{1 - \left[ \sin \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) / n \right]^2}} \right\} = 1,08$$

13.21. 0,22

13.22. В тумане  $I_{510} : I_{570} : I_{670} = 15 : 61 : 100$

13.24. 16 %

13.25.  $\frac{I_0 - I}{I} = 1 - \frac{\cos^2(VIB)}{2} = 0,95$

13.26. Да, свет будет пропущен

## Тема 14.

## Тепловое излучение. Внешний фотоэффект

**14.1.** На 7 %

**14.3.** 5

**14.5.** 36 Дж

**14.7.** 97%

**14.11.** Уменьшить в 2 раза

**14.13.** 5370 К;  
 $4,7 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$

**14.15.** +1660°C;  
2 %

**14.17.** Примерно в 1,2 раза

**14.19.**  $600 \text{ мм}^2$

**14.21.** 1,4 В

**14.23.** 1,43 В

**14.25.**  $0,4 \cdot 10^6 \text{ м/с}$

**14.2.** а) Крыша:  $400 \text{ Вт/м}^2$ ;  
боковая сторона:  $415,7 \text{ Вт/м}^2$ ;  
б) Крыша:  $800 \text{ Вт/м}^2$ ;  
боковая сторона:  $210 \text{ Вт/м}^2$   
(поскольку имеет температура окружающего воздуха)

**14.4.** До +37°C

**14.6.** +879°C

**14.8.** В 1,15 раза

**14.10.** +2850°C

**14.12.** Возрастёт в 11,2 раза

**14.14.**  $\lambda_m \approx 640 \text{ нм}$

**14.16.**  $9,8 \text{ МВт/м}^2$

**14.18.** Возрастёт примерно  
в 4,4 раза

**14.20.**  $8 \cdot 10^{16}$  фотонов

**14.22.** 0,67 В

$$\mathbf{14.26.} \quad w = \sigma T^4 \left( \frac{R_C}{R_3} \right)^2 \approx 8,4 \text{ Дж} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$$

**Тема 15.****Газовые законы.****Молекулярно-кинетическая теория газов**

**15.1.**  $+3,3^{\circ}\text{C}$

**15.3.**  $2,1 \cdot 10^8$  молекул

**15.5.**  $7,5$  кг

**15.2.**  $0,9$  МПа

**15.4.**  $3$  кг/м<sup>3</sup>

**15.8.** 
$$p = \frac{(l-h)h}{4\Delta h} - \frac{h\Delta h}{l-h} =$$
$$= 630 \text{ мм рт. ст.}$$

**15.9.**  $p_2 = p_a T_2 / T_1 + \rho R T_2 / \mu_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} =$ 
$$\approx 0,122 \text{ МПа} < p_{\text{кр}}$$

**15.10.**  $6$  молей

**15.11.**  $28,8$  г/моль

**15.12.**  $1,28$  кг/м<sup>2</sup>

**15.13.** До  $5,6$  МПа

**15.14.** В  $1$  кг –  $0,334 \cdot 10^{26}$  молекул;  
в  $1$  моле –  $6,02 \cdot 10^{23}$  молекул;  
в  $1$  литре –  $0,334 \cdot 10^{26}$  молекул

**15.15.**  $V = \frac{(v + M/\mu)RT}{p} = 3,3 \text{ л;}$

**15.16.**  $8,31$  м/с

$$n = \frac{N_A}{V} \left( v + \frac{M}{\mu} \right) =$$
$$= 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

**15.17.** В  $15,8$  раза

**15.18.**  $9,03 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

**15.19.**  $T = \frac{\mu \Delta v^2}{R(5 - 2\sqrt{6})} \approx 333,5 \text{ К}$

**15.20.**  $1,8 \cdot 10^{22}$  молекул

**15.21.**  $v = \sqrt{\frac{3RT_1T_2 \ln(T_1/T_2)}{\mu(T_1 - T_2)}} \approx 527 \text{ м/с}$

**15.22.**  $6$  км

**15.23.**  $80$  км

**15.24.** На  $8,5$  м и  $10,4$  м соответственно

**15.25.** На  $3,7\%$

## Тема 16.

## Термодинамика

- 16.1.** 831 Дж  
**16.3.** 124650 Дж  
**16.5.**  $c_v = 491 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $c_p = 687 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$   
**16.7.** 17451 Дж  
**16.9.** 19,8 кДж  
**16.11.** 800 Дж  
**16.13.**  $\Delta Q = 24,93 \text{ кДж}$ ;  
  
**16.15.**  $\Delta Q = 12465 \text{ Дж}$ ;  
 $A = 4986 \text{ Дж}$ ;  
 $\Delta U = 7479 \text{ Дж}$   
**16.17.**  $\Delta U = 3,25 \text{ МДж}$ ;  
 $A = 0,4 \text{ МДж}$ ;  
 $\Delta Q = 3,65 \text{ МДж}$   
**16.19.** Уменьшается в 6 раз  
**16.21.** 2493 Дж  
**16.23.**  $Q_H = 1570 \text{ кДж}$ ;  
 $Q_X = 1450 \text{ кДж}$ ;  
 $A = 120 \text{ кДж}$ ;  
 $\eta = 7,6 \%$   
**16.25.**  $\eta = 40 \%$ ;  
 $Q_X = 300 \text{ кДж}$   
**16.27.**  $\Delta S = -\frac{7}{2} \frac{MR}{\mu} \ln \frac{V_2}{V_1} = 1152 \text{ Дж/К}$   
**16.29.**  $Q = \frac{T_2}{S_2} (S_3^2 - S_2^2) = 120 \text{ кДж}$   
**16.31.**  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$   
  
**16.2.**  $W = 155 \text{ Дж}$   
**16.6.**  $c_v = 742 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $c_p = 1039 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$   
**16.8.** 1246,5 Дж  
**16.10.** 523520 Дж  
**16.12.** 250 Дж  
**16.14.**  $\Delta U = 240 \text{ кДж}$ ;  
 $A = 80 \text{ кДж}$ ;  
 $\Delta Q = 320 \text{ кДж}$   
**16.16.**  $\Delta Q = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = 8640 \text{ Дж}$ ;  
  
**16.18.** Уменьшается в 1,43 раза  
  
**16.20.**  $\text{CO}_2$   
**16.22.** 400 К  
**16.24.** 60 кДж  
  
**16.26.** 80 %  
  
**16.28.** 664,8 Дж/К  
  
**16.30.** 40 %

## Тема 17.

- 17.1. а)  $2,0 \cdot 10^{-42}$  М;  
б)  $6,6 \cdot 10^{-33}$  М;  
в)  $7,3 \cdot 10^{-9}$  М;  
г)  $3,0 \cdot 10^{-6}$  М
- 17.3. 0,45 мЭВ
- 17.5.  $2,5 \cdot 10^{-10}$  М
- 17.7. 0,33 нм
- 17.9.  $1 \cdot 10^3$  М/с  $\div$   $2 \cdot 10^3$  М/с
- 17.11. 
$$v = c \sqrt{1 - \left( \frac{eU}{mc^2} + 1 \right)^{-2}} =$$
$$= 2,82 \cdot 10^8 \text{ М/с};$$
$$\lambda = 0,88 \cdot 10^{-12} \text{ М}$$
- 17.13.  $3,5 \cdot 10^6$  М/с
- 17.15. В 5 раз
- 17.17.  $5 \cdot 10^{-7}$
- 17.19.  $7,3 \cdot 10^6$  М
- 17.23.  $4,6 \cdot 10^{-18}$  ЭВ
- 17.25. а)  $1,2 \cdot 10^{-13}$  М;  
б)  $2 \cdot 10^{-7}$

## Волновые свойства микрочастиц

- 17.2.  $5,5 \cdot 10^{-12}$  М
- 17.4. Масса  $1,68 \cdot 10^{-27}$  кг (протон)
- 17.6.  $7,4 \cdot 10^{-11}$  М
- 17.8.  $\lambda = \frac{h}{eBr} = 5,0 \cdot 10^{-14}$  М
- 17.12.  $E = \frac{h^2}{8md^2 \sin^2 \theta} = 2$  ЭВ
- 17.14. 0,4 мм
- 17.16. а)  $6,63 \cdot 10^{-22}$  М/с;  
б) 730 М/с
- 17.18.  $2,2 \cdot 10^{-30}$  М
- 17.20. 
$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{h}{0,5 \Delta x} \sqrt{\frac{1}{2mW}}$$
- 17.24. а)  $4,1 \cdot 10^{-7}$  ЭВ;  
б)  $2,2 \cdot 10^{-34}$  кг·М/с;  
в) 3 М
- 17.26.  $7,2 \cdot 10^{-13}$  с

## Тема 18.

**18.5.**  $7,3 \cdot 10^{14}$  Гц

**18.7.** 3

**18.9.**  $n = 2$

**18.11.** 0,94 мэВ

**18.13.**  $1/3$

**18.15.**  $P \approx 0,2$

**18.21.**  $R \approx 0,02$

**18.23.** 0,36

**18.25.**  $n \approx 0,17$

**18.27.** 0,94

**18.29.** 0,046

**18.31.** 2 эВ

## Микрочастица в потенциальной яме. Потенциальные барьеры

**18.4.**  $8 \cdot 10^{-14}$  м

**18.6.** 6,6 мэВ

**18.8.**  $l_2/l_1 \approx 1,63$

**18.10.** 11,3 мэВ

**18.14.**  $P = 1/4$

**18.16.**  $P \approx 1,8$

**18.18.**  $P = 1/8$

**18.22.**  $R_2/R_1 \approx 2$

**18.24.** 0,67

**18.26.**  $33^\circ 25'$

**18.28.** 0,07 нм

**18.32.**  $0,66 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с

**18.34.**  $E_0 = 0,26$  эВ;

$\Delta E = 0,52$  эВ



## Тема 19.

**19.1.**  $0,0529 \text{ нм}$

**19.3.**  $0,323$

**19.5.**  $1 \text{ нм}$

**19.7.**  $-0,85 \text{ В}$

**19.9.**  $F = \frac{\mu_{\text{Rb}} b v^2}{N_A S_1^2} = 4,2 \cdot 10^{-20} \text{ Н}$

**19.11.**  $8,4 \text{ мм}$

**19.13.**  $L = 0; 1,485 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с};$   
 $2,572 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с};$   
 $3,637 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с};$   
 $4,696 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с};$

$\alpha_{\min} = 26^\circ 34'$

**19.15.**  $L_{\max} = 2,58 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/$

**19.19.** В 1,67 раз

**19.21.** В 4 раза

**19.23.** а) 6;

б) 5;

в) 7

## Электрон в атоме водорода.

### Многоэлектронные атомы

**19.2.**  $1/\sqrt{\pi a^3} \approx 146,6 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3/2}$

**19.4.**  $1,08 \cdot 10^{-3}$

**19.6.**  $-13,5 \text{ В}$

**19.8.** Нельзя: энергии недостаточно

**19.10.**  $609 \text{ м/с}$

**19.12.**  $45^\circ; 35^\circ; 30^\circ$

**19.14.**  $2,3 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл};$

электрон

находится в  $d$ - состоянии

**19.18.** В  $M$ - оболочке содержится  
10  $d$ - электронов

**19.20.** На 4

**19.22.** а) 2;

б) 7;

в) 4

**19.24.** 28

**Тема 20.****Кристаллическая структура твёрдых тел**

- 20.1.** *Po*: 1;  
*W*: 2;  
базоцентрированная: 2;  
*Al*: 4;  
*La*: 1;  
*NaCl*: 4;  
*CeCl*: 1;  
*Be*: 2
- 20.2.** *Po*:  $a$ ;  
*W*:  $a\sqrt{3}/2$ ;  
базоцентрированная:  $a\sqrt{2}/2$ ;  
*Al*:  $a\sqrt{2}/2$ ;  
*La*:  $a$ ;  
*NaCl*:  $a\sqrt{2}$ ;  
*CeCl*:  $a$ ;  
*Be*:  $a$
- 20.3.** а) 6;  
б) 8;  
в) 12
- 20.4.**  $2 \cdot 10^{22}$
- 20.5.** 0,286 нм
- 20.6.**  $a = \sqrt[3]{(\mu_{\text{Na}} + \mu_{\text{Cl}})/(2N_{\text{A}}\rho)} =$   
 $= 0,2815 \text{ нм}$
- 20.7.** 0,00695 кг/моль
- 20.9.** *A*:  $[\bar{1}21]$ ; *B*:  $[[110]]$ ;  
*C*:  $[[20\bar{1}]]$ ; *D*:  $[[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]]$ ;  
*E*:  $[[2\bar{1}1]]$ .
- 20.10.** В 1,265 раза
- 20.11.** а)  $[10\bar{1}]$ ; б)  $[\bar{1}11]$ ; в)  $[100]$ ;  
г)  $[1\bar{1}1]$ ; д)  $[011]$
- 20.12.** *AB*  $[2\bar{1}\bar{1}]$ ; *BC*  $[1\bar{1}\bar{1}]$ ;  
*AC*  $[3\bar{2}\bar{2}]$ ; *ED*  $[302]$ ;  
*BE*  $[\bar{1}21]$
- 20.13.** а)  $[310]$ ; б)  $[22\bar{1}]$ ;  
в)  $[12\bar{2}]$ ; г)  $[3\bar{2}2]$
- 20.14.** 0,58а
- 20.15.** а) (111); б) (101);  
в) (111); г) (011);  
д) (010)
- 20.16.** 60°
- 20.17.** 4
- 20.18.** а) (111); б)  $(10\bar{2})$ ; в) (111);  
г) (101); д) (121); е)  $(2\bar{1}2)$
- 20.19.** *CDE*:  $(\bar{2}63)$ ;  
*EAD*:  $(22\bar{3})$ ;  
*ADC*:  $(2\bar{6}9)$
- 20.20.**  $\sqrt{3} a^2/2$
- 20.21.**  $a = \sqrt{3} \lambda / [2 \sin(\pi/2 - \varphi)] \approx$   
 $\approx 0,405 \text{ нм}$
- 20.22.** В  $4\sqrt{6}/9 \approx 1,09$  раза

## Тема 21.

**21.3.**  $2,03 \cdot 10^6 \text{ м/с}$

**21.5.** а) в 301 раз;

б) в 249 раз

**21.7.**  $2,8 \cdot 10^{48} \text{ Дж}^{-1}$

**21.9.** В 8 раз

**21.15.** 3,89

**21.17.** 11,7 эВ

**21.19.** В 66,7 раза

**21.21.**  $\frac{N_0}{N} = \left( \frac{2m_e E_F \lambda^2}{h^2} \right)^{3/2} = 2,8$

**21.23.**  $1,04 \cdot 10^6 \text{ м/с}$

## Основы квантовой статистики.

### Электронный газ в металле

**21.2.** 7,01 эВ

**21.4.**  $7,44 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

**21.6.** В 2 раза

**21.8.** В 8 раз

**21.14.**  $T = \frac{\Delta E}{k \ln \left( \frac{1}{N^*} - 1 \right)} = 116 \text{ K}$

**21.16.** В 1,52 раза

**21.18.** В 31,6 раз

**21.20.**  $0,63 E_F$

**21.22.**  $E_{CP} = \frac{3}{5} E_F = 1,5 \text{ эВ}$

**21.24.**  $p_{CP} = \frac{3}{4} \sqrt{2m_e E_F} = 7 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

**Тема 22.****Электрические свойства полупроводников**

- 22.1.** В 36 раз  
**22.3.** На 0,37 эВ  
**22.5.** В 1,62 раза
- 22.2.** 0,7 эВ  
**22.4.** 0,54 эВ  
**22.6.** 1,21 эВ
- 22.9.** Примерно в  $3,35 \cdot 10^3$  раз  
**22.11.** В  $e^{116} \approx 2,3 \cdot 10^{50}$  раз  
**22.13.**  $0,003 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$   
**22.15.**  $u_3 \approx \text{Const} \cdot T_3^{-3/2} \approx 65 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  
где  $\text{Const} \approx u_1 T_1^{3/2} \approx u_2 T_2^{3/2}$
- 22.10.** 0,064 эВ  
**22.12.**  $1,5 \cdot 10^{25}$   
**22.14.**  $0,005 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$   
**22.16.** Для зависимости вида  $u \sim T^\gamma$   
в диапазоне  $T_1 \div T_3$   $\gamma \approx -1,38$ ;  
в диапазоне  $T_3 \div T_2$   $\gamma \approx -0,37$
- 22.17.** 0,354 эВ;  
уменьшается в 7 раз  
**22.19.**  $2,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$   
**22.21.**  $n \approx 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ;  
 $u \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$   
**22.23.**  $n \approx 2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$
- 22.18.** Уменьшается в  $e^{30} \approx 10^{13}$  раз  
**22.20.** Уменьшается в 500 раз  
**22.22.**  $n \approx 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ;  
 $u \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$   
**22.24.**  $0,002 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

**Тема 23. Поглощение и излучение света в полупроводниках.**  
**Контактные явления**

- 23.1.**  $E_g = 3,27$  эВ;  
примесные переходы  
не проявляются
- 23.3.** а) 414,3 нм; 6215 нм;  
б) 414,3 нм; 444 нм; 6215 нм
- 23.5.** 7,5
- 23.7.** 2,875 эВ
- 23.9.** а) 460 нм; 2486 нм  
б) 460 нм; 565 нм; 2486 нм
- 23.11.** 659 нм
- 23.13.** 517,9 нм
- 23.15.** 414 нм
- 23.17.** 2,47 мкс
- 23.19.** 1,059
- 23.23.** 2550 мкА
- 23.25.** а) 57 Ом;  
б) 135 Ом
- 23.27.** 1,25 мА
- 23.8.** 4143 нм
- 23.10.** а) 621,5; 3108 нм  
б) 621,5; 777 нм; 3108 нм
- 23.12.**  $\Delta n = (\rho_0 - \rho) / [2e\mu_0\rho] =$   
 $= 1,25 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3};$   
 $\lambda_{\text{ГР}} = 1130 \text{ нм}$
- 23.14.** 0,12 эВ
- 23.16.** а) 2;  
б) 64
- 23.18.** 0,35
- 23.22.** 0,79
- 23.24.** 752
- 23.26.**  $T = eU / (k \cdot \ln 2) = 334,5 \text{ К}$
- 23.28.** 1,33

## Тема 24.

## Атомная физика. Элементарные частицы

- 24.7. За 20 мин  
24.9.  $1,6 \cdot 10^{23}$  ядер  
24.11. 20,62 эВ  
24.13. 1,6819 МэВ;  
 $0,73913 \cdot 10^{-12}$  м  
24.15. 2,9138 МэВ  
24.17. 15,18 МэВ; энергия выделяется  
24.19. 0,51 МэВ  
24.21. Протон и антипротон  
24.23.  $l \approx 19,8$  км  
24.25. 0,21 МэВ  
24.27.  $M \approx 1,46 \cdot 10^5$  кг  
24.4. 6  $\alpha$ - и 4  $\beta^-$  распадов  
24.6. В 4 раза  
24.8. За 3,96 года  
24.10.  $6,64653 \cdot 10^{-27}$  кг  
24.12. а)  $E_{\text{св}}/A = 7,076$  МэВ/нуклон;  
б)  $E_{\text{св}}/A = 7,681$  МэВ/нуклон  
24.14. 1,6819 МэВ;  
 $2,9549 \cdot 10^{-20}$  кг·м/с  
24.16.  $5,0084 \cdot 10^{-27}$  кг  
24.18. 1,4 МэВ; реакция эндотермическая  
24.20.  $E = 2,0$  МэВ;  
 $\lambda = 6,1 \cdot 10^{-13}$  м  
24.22.  $2,598 \cdot 10^8$  м/с  
24.24. 
$$\frac{v_e}{v_p} = \sqrt{\frac{1 - \frac{m_e^2 c^4}{(E_e + m_e c^2)^2}}{1 - \frac{m_p^2 c^4}{(E_p + m_p c^2)^2}}} \approx 20,4$$
  
24.26.  $2,68 \cdot 10^{23}$  нейтронов;  
 $3,34 \cdot 10^{23}$  протонов  
24.28. 40 %

## СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1.	КИНЕМАТИКА. . . . .	4
Тема 2.	ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ . . . .	9
Тема 3.	ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ. ЗАКО- НЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ . . . . .	14
Тема 4.	ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. . . . .	20
Тема 5.	ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ЭЛЕК- ТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ. . . . .	24
Тема 6.	ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. . . . .	30
Тема 7.	МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. .	36
Тема 8.	МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. ЭЛЕКТРОМАГ- НЕТИЗМ. . . . .	43
Тема 9.	СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ . . . . .	49
Тема 10.	ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕ- БАНИЙ. ВОЛНЫ. . . . .	53
Тема 11.	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН . . . . .	57
Тема 12.	ДИФРАКЦИЯ ВОЛН. . . . .	61
Тема 13.	ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯ- НИЕ СВЕТА. ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ . . . . .	64
Тема 14.	ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ .	69
Тема 15.	ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ . . . . .	73
Тема 16.	ТЕРМОДИНАМИКА. . . . .	77
Тема 17.	ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ . . . . .	81
Тема 18.	МИКРОЧАСТИЦА В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ. ПО- ТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ. . . . .	85
Тема 19.	ЭЛЕКТРОН В АТОМЕ ВОДОРОДА. МНОГОЭЛЕК- ТРОННЫЕ АТОМЫ. . . . .	91
Тема 20.	КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТВЁРДЫХ ТЕЛ . . .	95
Тема 21.	ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ. ЭЛЕКТРОН- НЫЙ ГАЗ В МЕТАЛЛЕ . . . . .	100
Тема 22.	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ .	103
Тема 23.	ПОГЛОЩЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА В ПОЛУПРО- ВОДНИКАХ. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ . . . . .	108
Тема 24.	АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. .	114
Ответы.	. . . . .	118

### Рекомендуемая литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987 – 1988 гг.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 2002. – 718 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 2000. – 542 с.
4. Физика твёрдого тела: Учеб. пособие/ И.К. Верещагин, С.М. Кокин, В.А. Никитенко, В.А. Селезнёв, Е.А. Серов; под ред. И.К. Верещагина. – М.: Высш. школа, 2001. – 237 с.
5. Чертов А.Г., Воробьёв А.А. Задачник по физике: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. Физ.-мат. литературы, 2002. – 640 с.
6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: ООО «Рада – Стайл», 2005. – 400 с.



Захарова Татьяна Владимировна  
Кокин Сергей Михайлович  
Кушко Анатолий Николаевич  
Мухин Сергей Васильевич  
Пауткина Анна Владимировна  
Селезнев Владимир Александрович

Касименко Лидия Михайловна  
Колотилова Валерия Григорьевна  
Лямзова Ирина Анатольевна  
Никитенко Владимир Александрович  
Пыканов Игорь Владимирович  
Стоюхин Сергей Глебович

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА»  
под общ. ред. проф. С.М. Кокина

Подписано к печати		Формат 60 × 84/16	
Тираж 500 экз.	Изд. №	Заказ №	Цена
127994 Москва, А-55, ул. Образцова 15. Типография МИИТ			