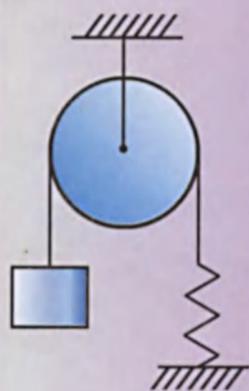
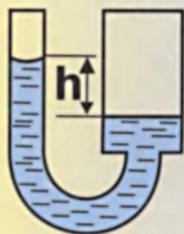
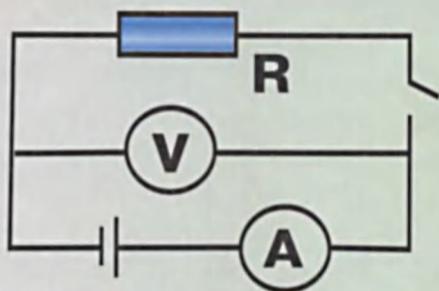




# СБОРНИК

# ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ

# ПО ФИЗИКЕ



*ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ*

---

# **СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

**Учебное пособие**

Под редакцией **Е.М.Гершензона**

*Утверждено  
Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов  
физико-математических факультетов  
педагогических университетов и институтов*

2-е издание, исправленное

Москва  
  
АКАДЕМ'А  
2002

УДК 53(076.1)(075.8)

ББК 22.3я73

С 23

**Авторы:**

*Н. Г. Птицина* (разд. 1, 2), *Н. В. Соина* (разд. 3, 4, 5),  
*Г. Н. Гольцман* (разд. 2, 4), *Э. Н. Гусинский* (разд. 5), *С. Р. Филонович* (разд. 4)

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор *Е. Н. Куркутова*;  
кандидат физико-математических наук, профессор *П. П. Бобров*

**Сборник вопросов и задач по общей физике: Учеб. пособие**  
С 23 для студ. физ.-мат. фак. высш. пед. учеб. заведений / *Н. Г. Птицина, Н. В. Соина, Г. Н. Гольцман* и др.; Под ред. *Е. М. Гершензона*. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2002. – 328 с.

ISBN 5-7695-0891-4

Сборник содержит около 2000 вопросов и задач по всем разделам курса общей физики. По каждой теме представлены задачи различной степени трудности и вопросы, позволяющие организовать самостоятельную работу студентов.

Для студентов физико-математических факультетов педагогических университетов и институтов.

УДК 53(076.1)(075.8)

ББК 22.3я73

ISBN 5-7695-0891-4

© Птицина Н.Г., Соина Н.В., Гольцман Г.Н. и др., 2002  
© Издательский центр «Академия», 2002

*Светлой памяти Н. Н. Малова посвящается*

## **Предисловие**

Умение анализировать и решать задачи – важнейший компонент физического образования, определяющий творческий характер усвоения материала. Это умение особенно важно для учителя физики средней школы, поскольку с задачами разной степени трудности ему приходится сталкиваться буквально ежедневно. Подготовка будущего учителя физики к этой деятельности начинается с курса общей физики. Между тем практически невозможно указать задачник, который отвечал бы основным потребностям курса общей физики педагогических университетов и институтов, в связи с чем преподавателям и студентам приходится обращаться к различным сборникам, а это создает дополнительные трудности.

Учитывая эти обстоятельства, коллектив кафедры общей и экспериментальной физики Московского государственного педагогического университета составил предлагаемый сборник вопросов и задач по общей физике. Авторы стремились охватить все основные темы курса, в том числе современные. По каждой теме в сборнике представлены задачи различной трудности, которые можно использовать на разных этапах изучения темы. В сборник включены не только расчетные задачи, но и вопросы, позволяющие организовать самостоятельную работу студентов по соответствующей теме.

Задачник представляет собой часть комплекта учебных пособий, включающего четырехтомный «Курс общей физики» Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова и А.Н.Мансурова, в котором «Молекулярная физика» является последним томом. Такой порядок изучаемых тем принят и в сборнике, что не мешает его использовать и при традиционной последовательности прохождения разделов курса.

Авторы будут признательны за любые замечания и предложения, которые могли бы способствовать улучшению этого учебного пособия.

# Раздел 1

## МЕХАНИКА

### 1.1. КИНЕМАТИКА

#### Движение с постоянной скоростью

**1.1.** В первую половину времени движения скорость автомобиля была  $v_1$ , во вторую половину –  $v_2$ . Какова средняя скорость его движения? Чему равна средняя скорость движения, если первую половину пути автомобиль прошел со скоростью  $v_1$ , а вторую – со скоростью  $v_2$ ?

**1.2.** Первую половину времени тело движется со скоростью  $v_1 = 30$  м/с под углом  $\alpha_1 = 30^\circ$  к заданному направлению, а вторую – под углом  $\alpha_2 = 120^\circ$  к тому же направлению со скоростью  $v_2 = 40$  м/с. Определите средний модуль скорости, а также модуль вектора средней скорости тела. Какой путь тело пройдет за время  $t = 40$  с?

**1.3.** Эскалатор метрополитена поднимает неподвижно стоящего на нем пассажира в течение времени  $t_1 = 3$  мин. По неподвижному эскалатору пассажир поднимается за время  $t_2 = 6$  мин. Сколько времени будет подниматься пассажир по движущемуся эскалатору?

**1.4.** Из пункта  $A$  по взаимно перпендикулярным дорогам выехали два автомобиля: один со скоростью 30 км/ч, другой со скоростью 40 км/ч. С какой относительной скоростью они удаляются друг от друга? Какое расстояние будет между ними через 3 ч?

**1.5.** Две частицы движутся с постоянными скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  по двум взаимно перпендикулярным прямым к точке их пересечения  $O$ . В момент  $t = 0$  частицы находились на расстояниях  $d_1$  и  $d_2$  от точки  $O$ . Через сколько времени после этого расстояние между частицами станет наименьшим? Чему оно равно?

**1.6.** В звездном скоплении одна из звезд покоится, а все остальные разбегаются от нее со скоростями, пропорциональными их расстояниям до этой звезды. Какую картину движения звезд увидят космонавты, высадившиеся на планете вблизи другой звезды этого скопления?

1.7. Два острова  $A$  и  $B$  лежат посередине реки на расстоянии  $s_1 = 0,5$  км один от другого по направлению течения, скорость которого  $v_1 = 2,5$  км/ч. На берегу напротив острова  $A$  находится пристань; расстояние между пристанью и островом равно  $s_2 = 0,5$  км. Гребец плывет на лодке один раз с острова  $A$  на остров  $B$  и обратно, другой раз с острова  $A$  к пристани и обратно. Скорость лодки в стоячей воде равна  $v_2$ . 1. При каком условии гребец может совершить первую поездку? 2. При каком условии он может переехать с острова на пристань по соединяющей их прямой? 3. Как в предыдущем случае он должен держать свой курс, если  $v_2 = 5$  км/ч? 4. Одинаковое ли время понадобится ему для этих двух поездок? 5. При какой скорости  $v_2$  первая из этих поездок потребует времени в  $n = 2$  раза больше, чем вторая?

1.8. Две пристани расположены друг против друга на противоположных берегах реки; скорость течения воды равна  $0,5$  м/с. Какой курс должна держать лодка перевозчика, чтобы пересекать реку по прямой линии от одной пристани до другой? С какой скоростью при этом лодка будет двигаться поперек реки? Относительно воды лодка развивает скорость  $0,8$  м/с,

1.9. Человек, находясь в точке  $B$  на расстоянии  $h$  от прямого участка дороги (рис. 1.1), видит в точке  $A$  автобус,двигающийся по дороге с постоянной скоростью  $\bar{v}_1$ . Расстояние  $AB$  от человека до автобуса в этот момент равно  $l$ . Под каким углом  $\varphi$  к прямой  $AB$  следует бежать человеку, чтобы оказаться на дороге, максимально опережая по времени автобус? Отношение расстояний  $h/l = 1/2$ ; отношение скоростей человека и автобуса  $v_ч/v_а = 1/\sqrt{2}$ .

1.10. Человек идет из поселка  $A$  в поселок  $B$ . При этом первую часть пути он движется по лесу со скоростью  $\bar{v}_1$ , а вторую по болоту со скоростью  $\bar{v}_2$ . Под какими углами  $\alpha$  и  $\beta$  к линии раздела лес – болото должен двигаться человек, чтобы время движения из пункта  $A$  в пункт  $B$  было наименьшим (рис. 1.2)?

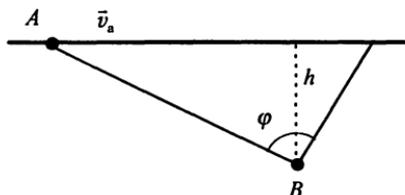


Рис. 1.1

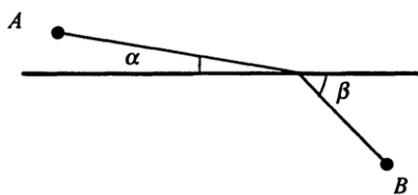


Рис. 1.2

1.11. С лодки  $L$  заметили катер  $K$  в тот момент, когда направление  $KL$  составляло  $90^\circ$  с курсом катера и расстояние  $KL$  было равно  $l$ . Лодка стремится как можно ближе подойти к катеру. Какое направление

должна выбрать лодка, если ее скорость  $v_1$ , скорость катера  $v_2 = kv_1$  ( $k > 1$ ) и катер не меняет своего курса? Каково наименьшее возможное расстояние между лодкой и катером? В какой системе отсчета легче получить ответ?

### Ускоренное движение

**1.12.** Векторы ускорения  $\vec{a}$  и скорости  $\vec{v}$  материальной точки имеют ориентацию, показанную на рисунке 1.3. Изобразите векторы  $\vec{a}_\tau$  и  $\vec{a}_n$ . Как изменяется модуль вектора скорости при этом движении? В каком направлении поворачивается вектор скорости?

**1.13.** Материальная точка движется по прямой. На рисунке 1.4 представлен график зависимости координаты  $x$  от времени  $t$ . Как движется материальная точка на различных участках пути? Нарисуйте график зависимости пути от времени  $s(t)$ . Найдите с помощью графика среднюю скорость за время движения  $t_1$  и  $t_2$ . Нарисуйте графики зависимости скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{a}$  от времени. Чему равно среднее ускорение за время движения  $t_1$ ? за время движения  $t_2$ ?

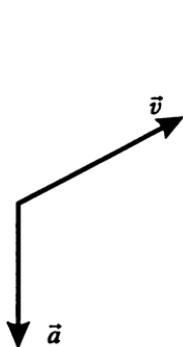


Рис. 1.3

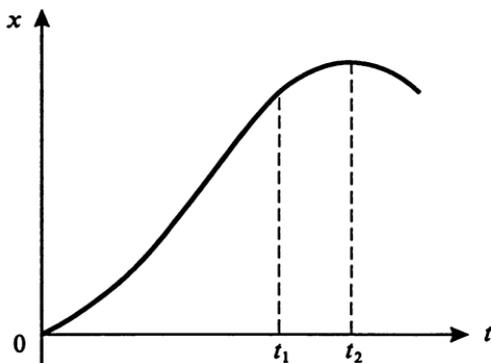


Рис. 1.4

**1.14.** Каков характер движения материальной точки, если закон движения в СИ имеет вид:

а)  $x(t) = 5 + 3t$ ; б)  $x(t) = 5 + 3t + 2t^2$

в)  $x(t) = 5 + 3t + 2t^2 - t^3$ ; г)  $x(t) = 5\sin 2\pi t$ .

**1.15.** По зависимостям, характеризующим прямолинейное движение (рис. 1.5,  $a - e$ ), постройте временные зависимости остальных кинематических величин:  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $x(t)$ ,  $s(t)$ . На рисунке 1.5,  $a$ ,  $b$  криволинейные участки графиков – части парабол. Начальные условия задайте самостоятельно.

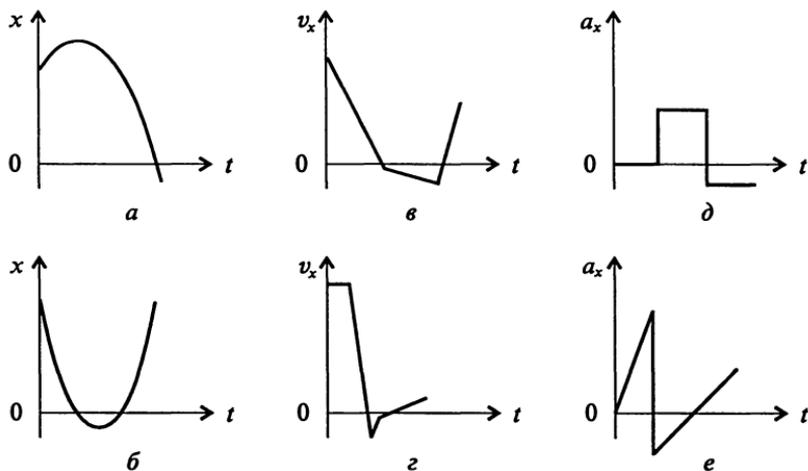


Рис. 1.5

**1.16.** Пассажир, стоящий на платформе, заметил, что первый вагон электропоезда прошел мимо него за 4 с, а второй – за 5 с. Когда поезд остановился, расстояние от его переднего края до пассажира оказалось равным 75 м. Считая движение поезда равноускоренным, определите его ускорение.

**1.17.** При свободном падении средняя скорость движения тела за последнюю секунду оказалась вдвое большей, чем за предыдущую. С какой высоты падало тело?

**1.18.** Какова допустимая предельная скорость приземления парашютиста, если человек может безопасно прыгать с высоты  $h = 2$  м?

**1.19.** За последнюю секунду свободно падающее без начальной скорости тело пролетело  $3/4$  всего пути. Сколько времени падало тело?

**1.20.** Ракета, запущенная вертикально вверх в течение времени  $t = 10$  с работы двигателя движется с ускорением  $2g$ . Определите максимальную высоту подъема ракеты и скорость ее падения на Землю. Начертите график зависимости координаты, скорости и ускорения от времени для всего полета. Считайте, что тормозные системы при спуске не работают и сопротивления воздуха нет.

**1.21.** На рисунке 1.6 показан график зависимости проекции ускорения  $\bar{a}$  вагона от пройденного пути. Как двигался вагон на отдельных участках? Что характеризует площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс? Что можно сказать о начальной и конечной скоростях вагона, если площади фигур  $A$  и  $B$  на графике равны?

**1.22.** Два тела брошены вертикально вверх из одной и той же точки с одной и той же начальной скоростью  $v_0 = 24,5$  м/с с промежутком времени  $\tau = 0,5$  с. Как двигаются тела относительно друг друга? Через

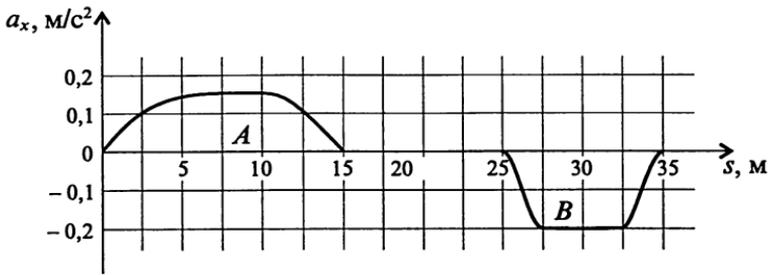


Рис. 1.6

сколько времени от момента бросания второго тела и на какой высоте  $h$  они столкнутся? Каков физический смысл решения, если  $\tau \geq 2v_0/g$ .

1.23. На берегу установлен блок, через который проходит веревка длиной  $l_0$ , привязанная одним концом к лодке (рис. 1.7). Подтягивая лодку к берегу, человек начал двигаться от блока, равномерно со скоростью  $\bar{v}_0$ . Какую скорость будет иметь лодка спустя время  $\tau$  после

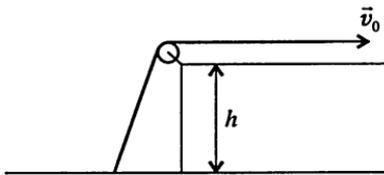


Рис. 1.7

начала движения человека? Высота берега над поверхностью воды  $h$ .

1.24. Лодка пересекает реку с постоянной относительно воды скоростью  $\bar{v}$ , перпендикулярной течению. Скорость течения реки, ширина которой  $d$ , равна нулю у берегов и линейно возрастает по мере приближения

к середине реки, где она достигает значения  $u$ . Определите траекторию лодки, а также снос лодки  $x_0$  вниз по течению от пункта ее отправления до места причала на противоположном берегу реки.

1.25. На лодке, имеющей скорость  $\bar{v}_0$ , спускают парус в момент времени  $t_0$ , но лодка продолжает двигаться. Во время движения лодки без паруса произведены измерения ее скорости, которые установили гиперболическую зависимость скорости от времени ( $v \sim 1/t$ ). Покажите что ускорение лодки было пропорционально квадрату ее скорости.

1.26. Поезд длиной  $l_0 = 350$  м начинает двигаться по прямому пути с постоянным ускорением  $a = 3 \cdot 10^{-2}$  м/с<sup>2</sup>. Через  $t = 30$  с после начала движения был включен прожектор локомотива (событие 1), а через  $t = 60$  с после этого сигнальная лампа в хвосте поезда (событие 2). Найдите расстояние между точками, в которых произошли эти события, в системах отсчета, связанных с поездом и Землей. Как и с какой постоянной скоростью  $\bar{v}$  относительно Земли должна перемещаться некоторая  $K$ -система отсчета, чтобы оба события произошли в ней в одной точке?

## Движение тел, брошенных под углом к горизонту

1.27. Из артиллерийского орудия произведен выстрел под углом  $\alpha_0$  к горизонту. Модуль начальной скорости снаряда равен  $v_0$ . Пренебрегая сопротивлением воздуха, найдите: 1) зависимость координат  $x$  и  $y$  от времени (ось  $X$  – горизонтальная, ось  $Y$  перпендикулярна поверхности Земли); 2) зависимость проекций  $v_x$  и  $v_y$  скорости от времени; 3) время полета снаряда в воздухе  $\tau$ ; 4) дальность полета  $s$ ; 5) максимальную высоту полета  $h$ ; 6) уравнение траектории движения снаряда; 7) зависимость угла  $\alpha$  между вектором скорости и осью  $X$  от времени и координаты  $x$  снаряда; 8) модули нормального и тангенциального ускорений в точке падения; 9) зависимость радиуса кривизны траектории снаряда от координаты  $x$ .

1.28. Два тела брошены одновременно из одной точки с одинаковой по модулю, но по-разному направленной скоростью  $\vec{v}_0$  (например, одно вертикально, а второе под углом  $\alpha$ ). 1. Каковы траектории движения этих тел в системе отсчета, связанной с Землей? 2. Каковы траектория и характер движения второго тела в системе отсчета, связанной с первым телом? 3. Как меняется со временем расстояние  $l$  между телами? 4. В какой системе отсчета удобнее искать ответ на последний вопрос?

1.29. Мальчик, стоящий на палубе корабля, бросает вертикально вверх мяч. Какова траектория движения мяча в системах отсчета, связанных с кораблем и Землей, если корабль движется: а) равномерно, б) равноускоренно?

1.30. Играет ли роль при прыжках в длину высота полета? Какие факторы определяют дальность прыжка?

1.31. Под каким углом к горизонту надо бросить тело, чтобы высота подъема была равна дальности полета?

1.32. Самолет летит на высоте  $h$  горизонтально по прямой со скоростью  $\vec{v}$ . Летчик должен сбросить бомбу на цель, лежащую впереди самолета. Под каким углом  $\alpha$  к вертикали он должен видеть цель в момент сбрасывания бомбы? Чему равно в этот момент расстояние  $l$  от цели до точки, над которой находится самолет? Сопротивлением воздуха пренебречь.

1.33. С машины, идущей со скоростью  $\vec{v}_0$ , на дорогу брошен мяч с горизонтальной скоростью  $\vec{u}$  относительно машины (рис. 1.8);  $u < v_0$ .

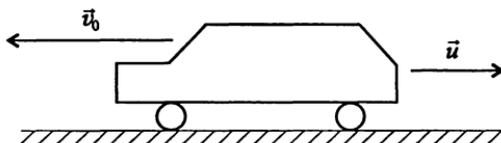


Рис. 1.8

Высота машины  $H$ . По какой траектории будет двигаться мяч относительно дороги? Удары мяча о дорогу считать упругими.

**1.34.** Тело брошено под углом  $\alpha_0 = 60^\circ$  к горизонту со скоростью  $v_0 = 20$  м/с. Под каким углом  $\alpha$  к горизонту движется тело через 1,5 с после начала движения? Через 2,5 с? Каковы радиусы кривизны траектории в этих точках?

**1.35.** Радиус кривизны траектории тела, брошенного под углом к горизонту, в верхней точке равен  $R = 20$  м, максимальная высота подъема  $h = 10$  м. С какой начальной скоростью и под каким углом к горизонту брошено тело?

**1.36.** С вышки одновременно с одинаковыми по модулю скоростями  $\vec{v}_0$  выбрасываются по всевозможным направлениям шарики. Как будут располагаться шарики в различные моменты времени относительно Земли?

**1.37.** Какой вид имеют годографы радиуса-вектора, скорости и ускорения для следующих случаев: а) тело движется поступательно с постоянной скоростью, с ускорением; б) материальная точка движется по окружности с постоянной скоростью, ускоренно; в) материальная точка движется по параболе в поле тяготения Земли.

### Движение по окружности

**1.38.** Найдите угловую скорость и нормальное ускорение при движении Земли по круговой орбите вокруг Солнца, Средний радиус земной орбиты  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км. Найдите линейную скорость орбитального движения Земли.

**1.39.** Определите угловую скорость вращения Земли вокруг своей оси. Найдите нормальное ускорение и линейную скорость точек земной поверхности на географической широте  $\varphi$ . Радиус земного шара 6400 км.

**1.40.** Известно, что Луна обращена к Земле всегда одной и той же стороной. Почему это возможно? В каком отношении находятся угловые скорости вращения Луны вокруг своей оси  $\omega_1$  и вокруг Земли  $\omega_2$ ?

**1.41.** Как показали радиолокационные измерения, Венера вращается вокруг своей оси в направлении, обратном ее орбитальному движению. Период осевого вращения Венеры (относительно звезд)  $T_1 = 243$  земных суток. Венера обращается вокруг Солнца с периодом  $T_2 = 225$  земных суток. Определите продолжительность солнечных суток на Венере, т. е. время  $T$  между двумя последовательными прохождениями Солнца через один и тот же меридиан на этой планете (время от полудня до полудня).

**1.42.** Определите скорость, с которой движется тень Луны по земной поверхности во время полного солнечного затмения, если оно на-

блюдается на экваторе. Для простоты можно считать, что плоскости солнечной и лунной орбит (относительно Земли) совпадают, а земная ось к ним перпендикулярна. Скорость света считать бесконечно большой по сравнению со всеми остальными скоростями, входящими в задачу. Радиус лунной орбиты  $R_{\text{л}} = 3,8 \cdot 10^5$  км.

1.43. 1. Круг с черным сектором (угол при центре равен  $40^\circ$ ) вращается вокруг оси, проходящей через центр круга перпендикулярно к его плоскости (рис. 1.9) с частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . Что будет видно на круге, если в темной комнате его освещать светом, мигающим 100 раз в секунду, причем длительность каждой вспышки света равна 0,003 с (неоновая лампа, работающая на переменном токе)? Принять во внимание, что поверхность, освещаемая светом, мигающим чаще, чем 10 раз в секунду, кажется тем более яркой, чем больше промежутки времени, в течение которых она освещается.

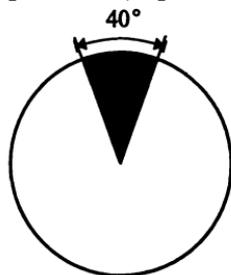


Рис. 1.9

2. Решите эту задачу для частоты вращения круга  $1470 \text{ мин}^{-1}$ .

1.44. Почему при просмотре кинокадров с движущимся автомобилем его колеса часто кажутся неподвижными или вращающимися с малой угловой скоростью?

1.45. 1. Колесо радиусом  $R$  вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью  $\omega_1$ . Укажите модуль и направление вектора ускорения для точки, находящейся на ободе колеса. Какой путь прошла эта точка, каково ее перемещение, чему равен модуль вектора средней скорости и средний модуль скорости, если колесо сделало пол оборота, один оборот?

2. Колесо радиусом  $R$  вращается с постоянным угловым ускорением  $\epsilon$ . Как меняются при движении модули нормального и тангенциального ускорений?

1.46. Разматывая веревку и вращая без скольжения вал ворота, ведро опускается в колодец с ускорением  $\alpha = 1 \text{ м/с}^2$ . С каким угловым ускорением  $\epsilon$  вращается вал ворота? Сколько оборотов сделает вал ворота, когда ведро опустится на глубину  $h = 10$  м? Чему равны нормальное, тангенциальное и полное ускорения точки на ободе ворота в этот момент времени? Радиус вала ворота равен  $R = 25$  см.

1.47. Колесо, вращаясь равноускоренно, при торможении уменьшило частоту вращения за 1 мин с 300 до  $180 \text{ мин}^{-1}$ . Найдите угловое ускорение колеса и число оборотов, сделанных им за это время? Через сколько времени колесо остановится? Какой путь за это время пройдет точка, находящаяся на ободе колеса, если радиус колеса 30 см?

1.48. Точка движется по окружности радиусом  $R = 20$  см с постоянным ускорением  $a_{\tau} = 5 \text{ см/с}^2$ . Через сколько времени после начала

движения нормальное ускорение  $a_n$  точки будет равно тангенциальному? Сколько оборотов сделает точка за это время?

1.49. Колесо радиусом  $R$  катится по дороге с постоянной скоростью  $\vec{v}_0$ . Чему равны угловая и линейная скорости вращения колеса в системе отсчета, связанной с центром колеса? Чему равны в заданный момент времени в неподвижной системе отсчета линейные скорости точек  $O, A, B, C$  колеса (рис. 1.10)? Найдите их значения, рассматривая движение колеса как вращение относительно мгновенной оси. Определите полное, тангенциальное и нормальное ускорения в точках  $O, A, B, C$ . Запишите уравнение траектории движения колеса в неподвижной системе отсчета (в параметрическом виде).

1.50. Автомобиль движется со скоростью  $\vec{v}_0$  по горизонтальной дороге, причем  $v_0^2 > Rg$ , где  $R$  – радиус колеса,  $g$  – ускорение свободного падения. На какую максимальную высоту может быть заброшена вверх грязь, срывающаяся с колес автомобиля? Укажите положение той точки на покрышке колеса, с которой при данной скорости движения автомобиля грязь будет забрасываться выше всего. Сопротивлением воздуха движению отброшенной грязи пренебречь.

1.51. Определите общую длину пути, проходимого иглой звукоснимателя проигрывателя за время проигрывания пластинки при частоте вращения  $33,3 \text{ мин}^{-1}$ . Считать, что игла движется по кривой, которая может быть аппроксимирована плотной спиралью Архимеда. Шаг спирали  $a = 2 \text{ мм}$ . Начальный и конечный радиусы спирали равны  $R_1 = 30 \text{ см}$ ,  $R_2 = 10 \text{ см}$ .

1.52. Шарик радиусом  $R = 3 \text{ см}$  катится равномерно и без скольжения по двум параллельным линейкам, расстояние между которыми  $d = 4 \text{ см}$  (рис. 1.11), и за время  $\tau = 2 \text{ с}$  проходит путь  $s = 120 \text{ см}$ . С какими скоростями движутся верхняя и нижняя точки шарика?

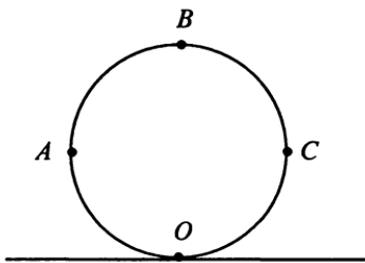


Рис. 1.10

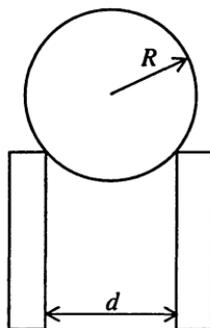


Рис. 1.11

1.53. Шар радиусом  $r = 16$  см насажен на горизонтальную ось и катится по плоской поверхности со скоростью  $v_0 = 60$  см/с, описывая окружность радиусом  $R = 30$  см (рис. 1.12). Определите угловую скорость шара и угол между вектором угловой скорости и горизонтом.

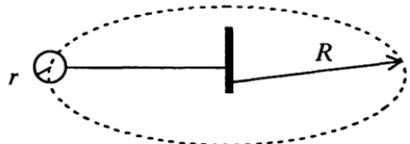


Рис. 1.12

### Колебательное движение

1.54. Тело одновременно участвует в двух одинаково направленных гармонических колебаниях одного периода с амплитудами  $A_1 = 5$  см и  $A_2 = 7$  см. Амплитуда результирующего колебания равна  $A = 9$  см. Определите: а) разность фаз складываемых колебаний; б) наибольшую скорость результирующего колебания  $v$ , если наибольшая скорость тела при первом колебании  $v_1 = 50$  см/с.

1.55. Что можно сказать о двух колебаниях материальной точки, если результат их сложения дает зависимость  $x(t)$ , представленную на рисунке 1.13? Запишите уравнения, характеризующие зависимость смещения точки от времени  $x(t)$  для каждого колебания.

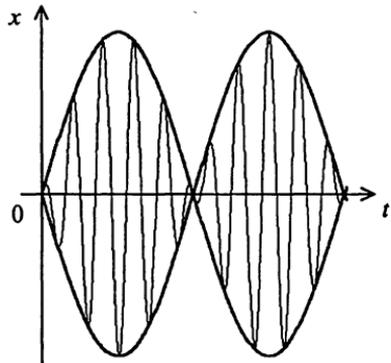


Рис. 1.13

1.56. В помещении установлены два электродвигателя. Когда работает один из двигателей, некоторая точка пола совершает колебания с амплитудой  $0,1$  мм и частотой  $1410$  мин<sup>-1</sup>. Когда работает второй двигатель, та же точка пола совершает колебания с той же амплитудой и частотой  $1440$  мин<sup>-1</sup>. Как будет колебаться эта точка, если оба двигателя будут работать одновременно?

1.57. Материальная точка участвует одновременно в трех гармонических колебаниях одинаковой частоты и одного направления, имеющих равные амплитуды. При каком сдвиге фаз  $\Delta\phi$  между колебаниями амплитуда суммарного колебания равна нулю? При решении воспользуйтесь методом векторных диаграмм. Получите ответ для случая  $4, 5, \dots, N$  колебаний.

1.58. Материальная точка одновременно участвует в  $N$  гармонических колебаниях одинаковой амплитуды и частоты с линейно нара-

тающей фазой:  $x_k = x_0 \cos(\omega t + k\varphi_0)$  ( $k = 1, 2, 3, \dots N$ ). Чему равна амплитуда суммарного колебания? При каком значении  $\varphi_0$  амплитуда максимальна? минимальна?

**1.59.** Движение точки происходит в плоскости, причем ее прямоугольные координаты определяются уравнениями  $x = A \cos \omega t$ ,  $y = B \sin \omega t$ . Какую траекторию описывает точка? Какой вид имеет годограф скорости? Найдите ускорение точки. Какой вид имеет годограф ускорения?

**1.60.** Сумма каких колебательных движений материальной точки дает траектории движения, показанные на рисунке 1.14,  $a - z$ ? Какие кинематические характеристики колебательного движения могут быть получены из анализа траекторий? (Стрелкой указаны направления движения.) Запишите уравнения траекторий для данных движений в явном и параметрическом виде.

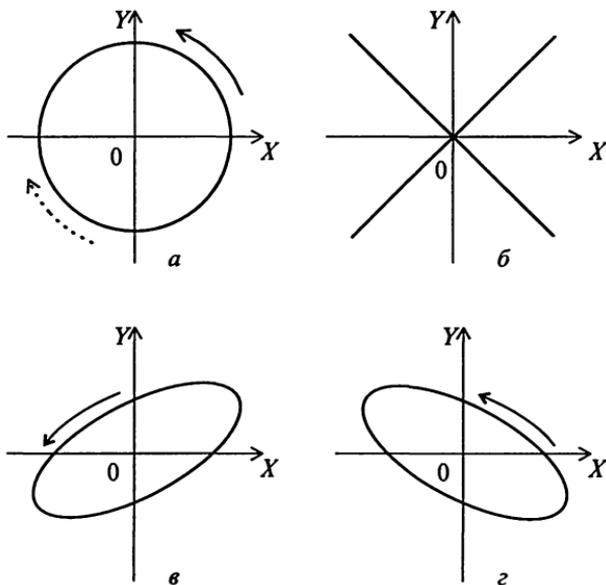


Рис. 1.14

**1.61.** Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, описываемых уравнениями  $x = a \cos \omega t$ ,  $y = a \sin 2\omega t$ . По какой траектории движется материальная точка?

**1.62.** Какова траектория движения луча на экране осциллографа, если на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины осциллографа поданы переменные напряжения, зависимость которых от времени показана на рисунке 1.15,  $a - \delta$ ?

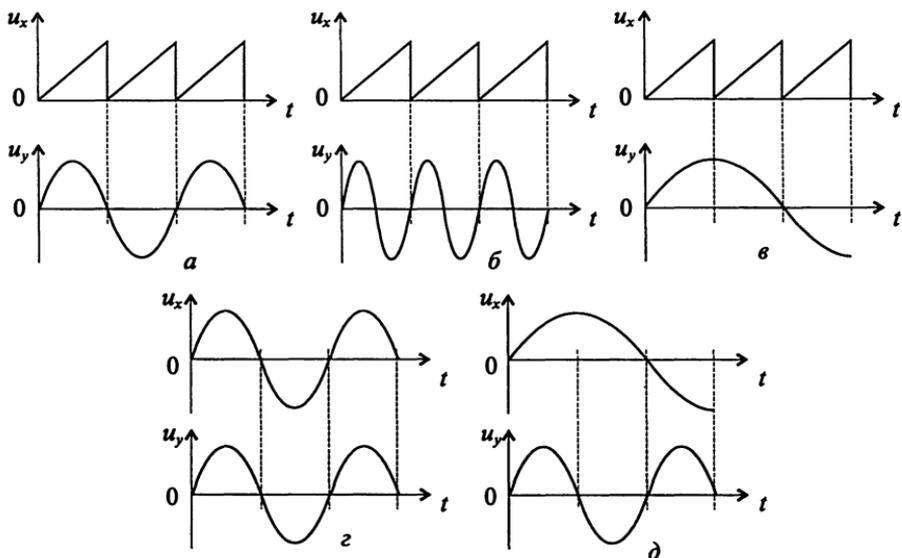


Рис. 1.15

## 1.2. ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

### Инерциальные системы отсчета. Законы Ньютона

**1.63.** К пружине прикреплено тело, надетое на стержень, вдоль которого оно может смещаться. Эта система может служить акселерометром – прибором для измерения ускорения тела, на котором он установлен. Рассмотрите движение тела в системе отсчета, связанной с Землей, и с движущейся машиной.

**1.64.** В каких физических задачах можно считать инерциальной систему отсчета, связанную с Землей, Солнцем, Галактикой, с движущейся ракетой? В каких задачах это будет неправильно?

**1.65.** Ньютон определял массу как меру количества вещества, заключенного в теле. Почему в современной физике это определение не используется? В каких явлениях наиболее ярко проявляется противоречие между современной и ньютоновской определениями массы?

**1.66.** Тело движется с постоянной скоростью в космическом пространстве. В некоторый момент времени на него начинает действовать сила. В каком направлении будет двигаться тело? Зависит ли ускорение, приобретаемое телом, от: а) направления силы; б) момента начала действия силы; в) скорости тела?

1.67. Сформулируйте принцип суперпозиции сил. Всегда ли он справедлив? Рассмотрите примеры: 1. К упругому телу приложена сила, растягивающая его на величину  $x_1$ , затем сила, растягивающая его на величину  $x_2$ . Чему будет равно растяжение тела при одновременном действии обеих сил? 2. К незаряженному телу подносятся заряды  $q_1$  и  $q_2$ , которые поляризуют его. Будет ли сила, действующая на тело в этом случае, равна векторной сумме сил, действующих при наличии только заряда  $q_1$  или только  $q_2$ ? 3. Тело движется в направлении оси  $X$  со скоростью  $v_1$ , а вдоль оси  $Y$  – со скоростью  $v_2$ . Коэффициент трения равен  $\mu$ . Чему равна сила трения, действующая на тело, если сила трения пропорциональна скорости? квадрату скорости? Выполняется ли принцип суперпозиции сил в этих случаях?

1.68. Запишите уравнение динамики для каждого тела, входящего в систему тел (рис. 1.16,  $a-l$ ).

1.69. Доска покоится горизонтально на двух опорах, расположенных под ее концами. Посередине доски лежит тело. Какие силы действуют на это тело? Какие силы действуют на доску и на опоры?

1.70. На доске стоит человек. Внезапно он приседает. Увеличится или уменьшится прогиб доски в начальный момент? Что произойдет, если человек внезапно встанет?

1.71. Лошадь равномерно тянет сани. Рассмотрите взаимодействие трех тел: лошади, саней и Земли. Начертите векторы сил, действующих на каждое из тел в отдельности, и установите связь между ними.

1.72. Известно, что раскрученное колесо не меняет своей угловой скорости в отсутствие каких-либо внешних сил. Однако каждая точка колеса движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным к центру. Какие силы создают это ускорение?

1.73. Монета лежит на вращающемся диске. При определенной скорости вращения диска монета соскальзывает. Почему? От чего зависит предельное значение угловой скорости вращения?

1.74. Почему под действием пули, вылетевшей из ружья, дверь не может открыться, но в ней пробивается отверстие, в то время как пальцем дверь открыть легко, но проделать отверстие невозможно?

1.75. Почему при резком торможении машину заносит (автомобиль теряет управление)?

1.76. При каких условиях вес тела равен нулю? Зависит ли его значение от выбора системы отсчета?

1.77. В одной из фантастических книг описывается, что обитатели запущенного на Луну снаряда перестали ощущать силу тяжести. Возможно ли это? Если возможно, то в какой момент?

1.78. Космический корабль движется свободно в пространстве вдали от других тел. Что будут испытывать космонавты, когда корабль начнет приближаться к космическому телу?

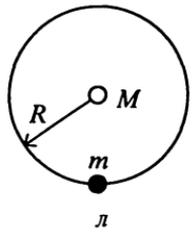
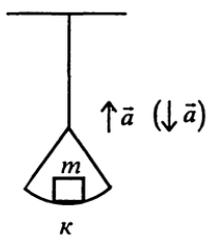
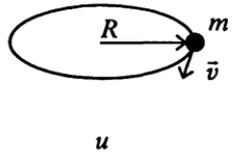
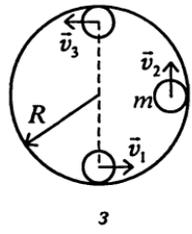
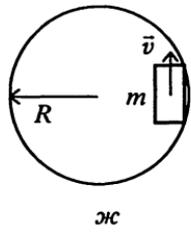
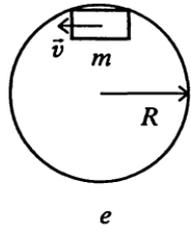
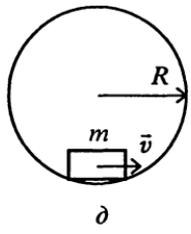
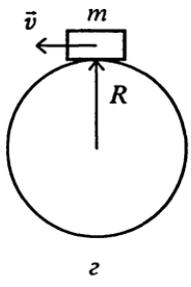
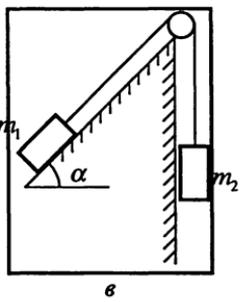
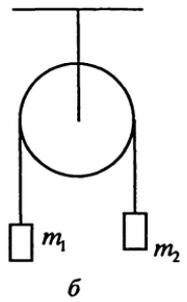
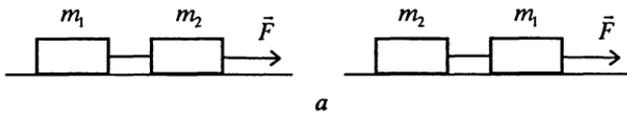


Рис. 1.16

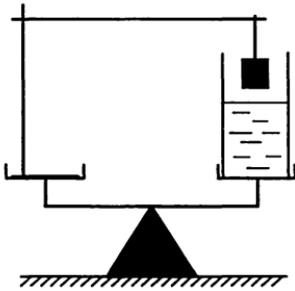


Рис. 1.17

1.79. Парусный корабль движется за счет силы ветра, надувающего паруса. Может ли парусник двигаться со скоростью, большей скорости ветра? Сделайте схематический рисунок и поясните свой ответ.

1.80. На чашах весов уравновешен штатив с подвешенным грузом и стакан с водой (рис. 1.17). Как изменится равновесие весов, если груз опустить в воду?

### Прямолинейное движение материальной точки

1.81. Несколько наклонных плоскостей имеют общее основание (рис. 1.18). 1. Каков наклон плоскости к горизонту, если время соскальзывания тел по этой плоскости меньше, чем по остальным плоскостям? Рассмотрите случаи, когда трение ничтожно мало и когда коэффициент трения  $\mu = 0,25$ . 2. Каков коэффициент трения, если время соскальзывания при наклоне  $\alpha_1 = 60^\circ$  и время соскальзывания при наклоне  $\alpha_2 = 45^\circ$  равны между собой?

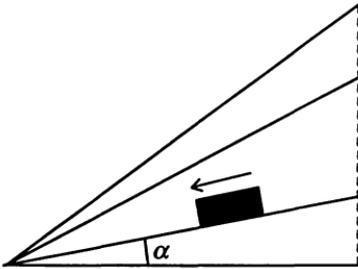


Рис. 1.18

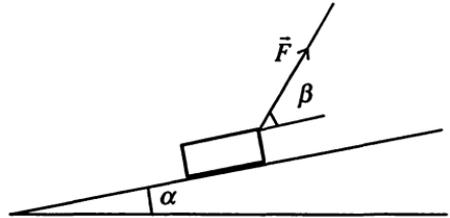


Рис. 1.19

1.82. По наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом, скользит доска массой  $m_1$ , на которой находится брусок массой  $m_2$ . Определите ускорение доски  $a_1$  и ускорение бруска  $a_2$ , если коэффициенты трения доски о наклонную плоскость и бруска о доску равны соответственно  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Рассмотрите следующие случаи: а)  $\text{tg } \alpha > \mu_1 = \mu_2$ ; б)  $\text{tg } \alpha > \mu_1 > \mu_2$ ; в)  $\text{tg } \alpha > \mu_2 > \mu_1$ ; г)  $\mu_2 > \text{tg } \alpha > \mu_1$ ; д)  $\mu_1 > \text{tg } \alpha > \mu_2$ ;

1.83. Стальной шарик падает на горизонтальную поверхность стола с высоты  $h_1 = 25,6$  см и, отскочив, поднимается на высоту  $h_2 = 19,6$  см. Масса шарика 10 г. Какова средняя сила, с которой шарик действо-

вал на стол при ударе, если соударение шарика со столом длилось  $\tau = 10^{-4}$  с? Трением при движении шарика в воздухе пренебречь.

**1.84.** Брусок массой  $m$  втаскивают за нить с постоянной скоростью вверх по наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом (рис. 1.19). Коэффициент трения равен  $\mu$ . Найдите угол  $\beta$ , который должна составлять нить с наклонной плоскостью, чтобы сила натяжения нити была наименьшей.

**1.85.** На наклонную плоскость, составляющую угол  $\alpha$  с горизонтом, поместили два соприкасающихся бруска 1 и 2 (рис. 1.20) массами  $m_1$  и  $m_2$ , коэффициенты трения между наклонной плоскостью и этими брусками соответственно равны  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , причем  $\mu_1 > \mu_2$ . Найдите: а) силу взаимодействия между брусками при движении; б) минимальное значение угла  $\alpha$ , при котором начнется скольжение.

**1.86.** На горизонтальной поверхности находится прямоугольная призма 1 массой  $m_1$  с углом  $\alpha$  и на ней брусок 2 массой  $m_2$  (рис. 1.21). Пренебрегая трением, найдите ускорение призмы (при движении бруска) относительно неподвижной системы координат.

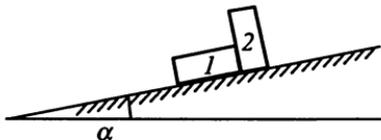


Рис. 1.20

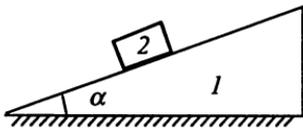


Рис. 1.21

**1.87.** Брусок 1 массой  $M$  может двигаться без трения по гладкой горизонтальной поверхности. На бруске находится тело 2 массой  $m$  (рис. 1.22). Коэффициент трения между телом и бруском равен  $\mu$ . При каком значении силы  $\vec{F}$ , приложенной к бруску, тело начнет скользить по бруску? Через какое время тело упадет с бруска, если длина бруска  $l$ ?

**1.88.** Маятник массой  $m$  подвешен к подставке, укрепленной на тележке. Найдите направление нити маятника, т.е. угол  $\alpha$ , образуемый нитью маятника с вертикалью, и силу натяжения нити в следующих случаях: а) тележка равномерно движется по горизонтальной плоскости; б) тележка движется горизонтально с ускорением  $\vec{a}$ ; в) тележка свободно скатывается с наклонной плоскости, образующей угол  $\varphi$  с горизонтом; г) тележка с некоторым ускорением  $\vec{b}$ , направленным вдоль наклонной плоскости, вкатывается на нее; д) тележка с тем же ускорением  $\vec{b}$  скатывается с наклонной плоскости.

**1.89.** В снаряде, выпущенном вертикально вверх, на пружинах укреплен грузик  $A$  массой  $m$  (рис. 1.23). Определите силу, действующую на грузик со стороны пружин при подъеме и спуске снаряда? Решите задачу без учета и с учетом сопротивления воздуха движению снаряда.

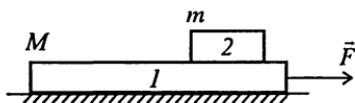


Рис. 1.22

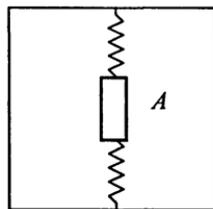


Рис. 1.23

### Движение материальной точки по окружности

**1.90.** Небольшому телу  $A$ , находящемуся на вершине гладкой сферы радиусом  $R$ , сообщили скорость  $\vec{v}_0$  в горизонтальном направлении (рис. 1.24). Найдите условие, при котором тело будет некоторое время скользить по сфере. Определите угол  $\varphi$ , соответствующий точке отрыва, и скорость тела в этот момент.

**1.91.** Самолет делает «мертвую петлю» радиусом  $R = 100$  м и движется по ней со скоростью  $v = 280$  км/ч. С какой силой тело летчика массой  $m = 80$  кг будет давить на сиденье самолета в верхней и нижней точках петли?

**1.92.** Самолет совершает вираж, двигаясь по окружности с постоянной скоростью  $v$  на одной и той же высоте. Определите радиус  $r$  этой окружности, если плоскость крыла самолета наклонена к горизонтальной плоскости под постоянным углом  $\alpha$ .

**1.93.** Шарик радиусом  $R$  висит на нити длиной  $l$  и касается верхней точки образующей вертикального цилиндра радиусом  $r$ , установленного на оси центробежной машины (рис. 1.25). При какой угловой скорости  $\omega$  вращения центробежной машины шарик перестает давить на цилиндр?

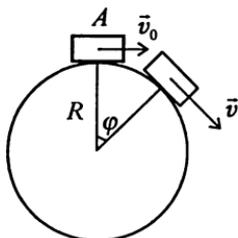


Рис. 1.24

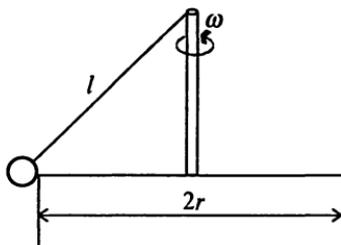


Рис. 1.25

**1.94.** Тело, масса которого  $m = 1$  кг, вблизи экватора весит  $P = 9,7$  Н. Принимая экваториальный радиус Земли равным 6378 км, определите

силу притяжения этого тела Землей. Каким был бы вес тела  $P'$  на экваторе, если бы Земля вращалась в 10 раз быстрее? При какой угловой скорости вращения Земли сила тяжести не могла бы удержать тело на поверхности Земли?

**1.95.** Шофер, едущий на автомобиле по горизонтальной поверхности в тумане, внезапно заметил недалеко впереди себя стену, перпендикулярную к направлению движения. Что лучше сделать, чтобы предотвратить аварию: затормозить или повернуть в сторону (при той же скорости)?

**1.96.** На закруглениях железнодорожного пути наружный рельс делают немного приподнятым по сравнению с внутренним. Объясните, для чего это делается, и дайте расчет необходимого угла наклона полотна.

**1.97.** Известен такой аттракцион: кабина с вогнутым полом вращается вокруг вертикальной оси. Во время вращения кабины все находящиеся в ней предметы и люди стоят на этом полу, как на плоском, устойчиво и перпендикулярно к его поверхности. Какую форму должен иметь пол, если угловая скорость вращения равна  $\omega$ ?

**1.98.** Определите форму свободной поверхности жидкости, равномерно вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси в цилиндрическом сосуде.

**1.99.** Вес доски неподвижных качелей с сидящими на ней людьми равен  $P$ . Какую наибольшую силу натяжения  $T$  будут испытывать веревки, если отвести качели на угол  $\alpha = 45^\circ$  от положения равновесия и предоставить им возможность свободно качаться?

**1.100.** Шарик, подвешенный на нити, качается в вертикальной плоскости так, что его ускорения в крайнем и нижнем положениях одинаковы по модулю. Найдите угол отклонения нити в крайнем положении.

**1.101.** Стержень  $AB$  равномерно вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, проходящей через его конец. По стержню с постоянной скоростью  $\vec{v}$  перемещают шарик массой  $m$  (рис. 1.26). Какие силы действуют на шарик? С какой силой шарик действует на стержень?

**1.102.** Муфточка  $A$  может свободно скользить вдоль гладкого стержня, изогнутого в форме полукольца радиусом  $R$  (рис. 1.27). Систе-

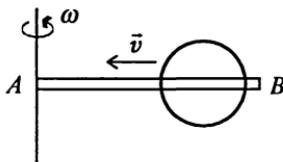


Рис. 1.26

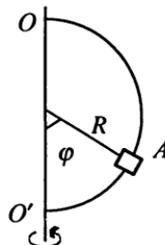


Рис. 1.27

му привели во вращение с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси  $OO'$ . Найдите угол  $\varphi$ , соответствующий устойчивому положению муфточки.

**1.103.** По гладкой внутренней поверхности чаши, имеющей форму параболоида вращения с вертикальной осью  $Z$ , с высоты  $h$  соскальзывает тело массой  $m$ . Уравнение параболоида  $z = k(x^2 + y^2)$ . Найдите ускорение  $a$  тела и силу  $F$ , с которой оно действует на дно чаши в ее нижней точке.

### Движение системы тел, связанных нерастяжимой нитью

**1.104.** На гладкую горизонтальную поверхность помещены три бруска массой  $m_1, m_2, m_3$ , связанные нитями между собой и с грузом массой  $M$ , привязанным к нити, перекинутой через блок (рис. 1.28). Найдите ускорение  $a$  системы и силы натяжения всех нитей. Массами блока и нитей пренебречь.

**1.105.** Машина Атвуда уравновешена на весах при заторможенном блоке (рис. 1.29). В какую сторону и насколько нарушится равновесие весов, если освободить тормоз блока? Массой блока и нитей пренебречь. Нить считать нерастяжимой. Массы грузов, подвешенных на нитях, равны  $m_1$  и  $m_2$ .

**1.106.** На верхнем краю наклонной плоскости укреплен блок, через который перекинута нить. К одному ее концу привязан груз  $1$  массой  $m_1$ , лежащий на наклонной плоскости. На другом конце висит груз  $2$  массой  $m_2$  (рис. 1.30). Наклонная плоскость образует с горизонтом угол  $\alpha$ . Коэффициент трения скольжения тела  $1$  по наклонной плоскости равен  $\mu$ . Массой блоков и нитей можно пренебречь. Считая, что в начальный момент оба тела неподвижны, определите отношение масс  $m_2/m_1$ , при котором тело  $2$ : а) начнет опускаться; б) начнет подниматься; в) остается в покое. С каким ускорением  $a$  движутся грузы и какова сила натяжения нити  $T$  для случая а)? для случая б)? Определите силу натяжения нити, если тело  $2$  неподвижно.

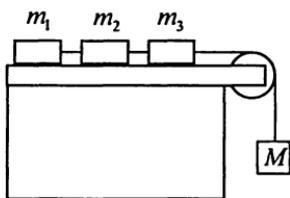


Рис. 1.28

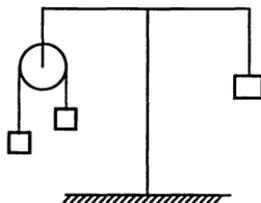


Рис. 1.29

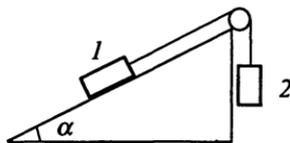


Рис. 1.30

**1.107.** Определите ускорения  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  тел массами  $m_1$  и  $m_2$  и силу натяжения нитей в системе, изображенной на рисунке 1.31. Массой блоков и нитей пренебречь.

1.108. Определите ускорение тела массой  $m_1$  и силы натяжения нитей 1 и 2 в системе, изображенной на рисунке 1.32. Массой блоков и нитей пренебречь, силы трения не учитывать.

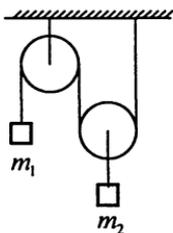


Рис. 1.31

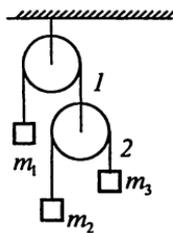


Рис. 1.32

### Движение материальной точки под действием силы, зависящей от скорости

1.109. Тело массой  $m$ , имеющее начальную скорость  $\vec{v}_0$ , движется в вязкой среде. Сила трения  $\vec{F} = -r\vec{v}$ . Найдите ускорение, скорость и путь, пройденный телом, в зависимости от времени.

1.110. Тело массой  $m$  брошено вертикально вверх с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Как изменяются координата, скорость и ускорение тела от времени при его подъеме и спуске, если сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости тела:  $\vec{F}_{\text{тр}} = -r\vec{v}$ . Чему равно время подъема?

1.111. Парашютист совершает затяжной прыжок. До раскрытия парашюта он падает со скоростью 60 м/с, после раскрытия приземляется со скоростью 4 м/с. Вычислите, какой была бы максимальная сила натяжения строп парашюта, если бы в конце затяжного прыжка он раскрывался мгновенно. Масса парашютиста 80 кг, а силу сопротивления воздуха движущемуся парашютисту можно считать пропорциональной квадрату скорости. Считать массу парашюта и его строп малой по сравнению с массой парашютиста.

1.112. Пуля пробив доску толщиной  $h$ , изменила свою скорость от  $v_0$  до  $v_1$ . Найдите время движения пули в доске, считая силу сопротивления пропорциональной квадрату скорости.

1.113. На горизонтальной поверхности с коэффициентом трения  $\mu$  лежит тело массой  $m$ . В момент  $t = 0$  на него стала действовать сила в горизонтальном направлении, меняющаяся со временем по закону  $\vec{F} = \vec{b}t$ , где  $\vec{b}$  – постоянный вектор. Найдите путь, пройденный телом за время  $t$  от начала действия этой силы.

**1.114.** Из облака, находящегося на высоте  $h = 1$  км, в безветренный день падают на землю дождевые капли массой  $m = 3,2 \cdot 10^{-6}$  кг. Учитывая, что коэффициент пропорциональности между силой сопротивления воздуха и скоростью капель такого размера  $r = 7 \cdot 10^{-6}$  кг/с и масса капли во время падения не меняются, определите относительно неподвижного наблюдателя характер движения капли и скорость капли у поверхности Земли. Во сколько раз сопротивление воздуха уменьшает скорость капли у поверхности Земли?

**1.115.** Тело брошено под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Как зависят координаты  $x$  и  $y$  от времени, если сила сопротивления воздуха равна  $\vec{F} = -r\vec{v}$ ? Начертите графики зависимости  $y(t)$  и  $x(t)$  и вид траектории движения тела.

### 1.3. РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

**1.116.** На тело массой  $m$ , находящееся в равномерно движущемся со скоростью  $\vec{v}_0$  поезде, действует сила  $\vec{F}$ , изменяющая его скорость от  $v_1$  до  $v_2$ . Определите работу силы в неподвижной системе и в системе, связанной с движущимся поездом. Скорости тела даны в системе отсчета, связанной с поездом.

**1.117.** На материальную точку действуют силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Чему равна полная работа, совершаемая этими силами на некотором участке длиной  $s$ ?

**1.118.** Тело массой  $m$  брошено под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Как изменяется кинетическая энергия тела в неподвижной системе отсчета и системе отсчета, движущейся со скоростью  $v_0 \cos \alpha$  в горизонтальном направлении? Чему равна работа силы, сообщившей телу скорость в этих системах отсчета? Чему равна работа силы тяжести?

**1.119.** Частица перемещается по окружности радиусом  $R$  под действием центральной силы  $\vec{F}$ . Какую работу совершает сила  $\vec{F}$  на пути  $s$ ?

**1.120.** Тело массой  $m$  падает с высоты  $h$ . Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите среднюю мощность  $N_{\text{ср}}$ , развиваемую силой тяжести на пути  $h_0$ , и мгновенную мощность  $N$  на высоте  $h_0/2$ .

**1.121.** Два бруска (см. рис. 1.22) под действием силы  $\vec{F}$ , приложенной к бруску  $l$ , движутся равноускоренно. Определите работу, которую совершают силы трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ , если: а)  $a_1 = a_2$ ; б)  $a_1 > a_2$ .

**1.122.** Шайба на вращающемся диске удерживается силой трения. Совершает ли сила трения в этом случае работу?

1.123. На рисунке 1.33, *а*, *б*, *в* приведены графики зависимостей консервативных сил, действующих на материальные точки, от расстояния. Нарисуйте графики зависимости потенциальной энергии этих тел от расстояния.

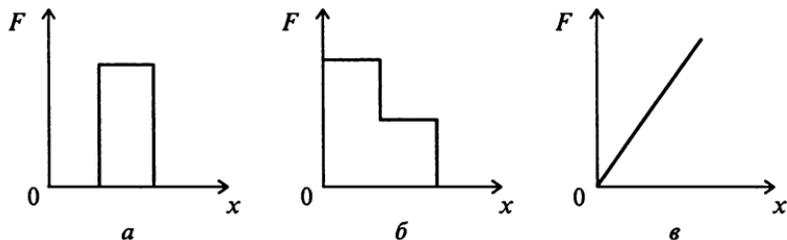


Рис. 1.33

1.124. На рисунке 1.34 *а*, *б*, *в* приведены графики зависимостей потенциальной энергии  $E_p$  материальной точки от расстояния. Нарисуйте графики зависимости сил, действующих на эту точку от расстояния.

1.125. Материальная точка находится в поле сил, для которых зависимость потенциальной энергии от расстояния может быть представлена кривой, показанной на рисунке 1.35 (этот график качественно отражает взаимодействие двух молекул газа). Что можно сказать о силах, которые действуют между молекулами на различных расстояниях? При каком значении  $R$  действующая на частицу сила равна нулю?

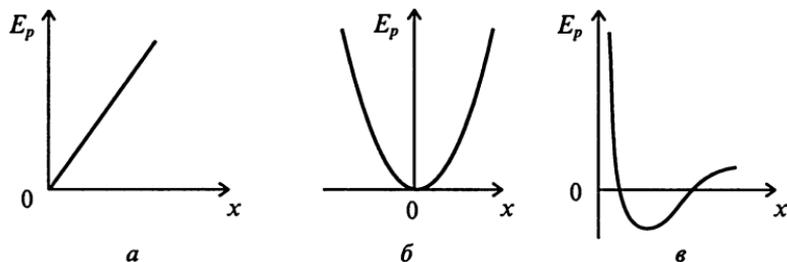


Рис. 1.34

Нарисуйте график зависимости силы от расстояния. Как будет двигаться материальная точка при различных значениях полной энергии ( $E_1, E_2, E_3, E_4$ )?

1.126. Потенциальная энергия частицы, находящейся в центрально-симметричном силовом поле, определяется выражением  $E_p = \frac{a}{r^3} - \frac{b}{r^2}$ , где  $a$  и  $b$  – положительные константы. Чему равна сила, действующая

на частицу, находящуюся на расстоянии  $r$  от центра поля? Имеется ли у этой частицы положение устойчивого равновесия по отношению к радиальным смещениям? Нарисуйте графики зависимостей  $F(r)$  и  $E_p(r)$ . При каких значениях полной энергии движение финитно? инфинитно?

**1.127.** Определите потенциальную энергию сжатой пружины в зависимости от деформации  $x$ , если сила упругости: а) пропорциональна  $x$ , б) пропорциональна  $x^3$ .

**1.128.** Космический корабль движется в межгалактическом пространстве. Как изменится его полная механическая энергия, если: а) включается двигатель, изменяющий модуль скорости или ее направление; б) корабль влетает в поле тяготения какой-нибудь планеты?

**1.129.** Два одинаковых тела соскальзывают без трения и без начальных скоростей с наклонных плоскостей 1 и 2 (рис. 1.36). Сравните скорости у основания наклонных плоскостей и время соскальзывания.

**1.130.** Тело массой  $m$  брошено под углом  $\alpha$  к горизонту с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Нарисуйте графики зависимостей полной, потенциальной и кинетической энергии тела от времени.

**1.131.** Двум одинаковым телам сообщают одинаковые скорости, ориентированные под углом  $\alpha$  к горизонту. Одно тело свободное, другое движется вдоль спицы. Сравните высоты, на которые поднимутся эти тела.

**1.132.** На Землю с очень большого расстояния от ее поверхности падает метеорит (его начальная скорость  $v_0 \approx 0$ ). Как изменяются его потенциальная, кинетическая и полная энергии в зависимости от расстояния до центра Земли? Сопротивлением атмосферы пренебречь. Дайте качественный ответ на поставленный вопрос при учете сил сопротивления среды.

**1.133.** От груза массой  $2m$ , висящего на пружине жесткостью  $k$  (рис. 1.37), отрывается нижняя часть массой  $m$ . На какую максимальную высоту поднимается после этого оставшаяся часть груза? Как она будет двигаться в дальнейшем?

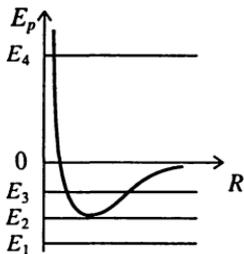


Рис. 1.35

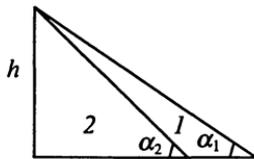


Рис. 1.36

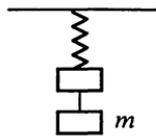


Рис. 1.37

1.134. Шайба массой  $m = 50$  г соскальзывает без начальной скорости по наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha = 30^\circ$  с горизонтом и, пройдя по горизонтальной плоскости расстояние  $l = 50$  см, останавливается. Найдите работу сил трения на всем пути, считая коэффициент трения равным  $\mu = 0,15$ .

1.135. Определите среднюю полезную мощность при выстреле из гладкоствольного ружья, если известно, что пуля массой  $m$  вылетает из ствола со скоростью  $v_0$ , а длина канала ствола  $l$  (давление пороховых газов считать постоянным во все время нахождения снаряда в канале ствола).

1.136. Конькобежец движется по горизонтальному пути равномерно, а затем с разгона проезжает до остановки 60 м в течение 25 с. Масса конькобежца 50 кг. Определите, считая движение с разгона равноускоренным: а) коэффициент трения; б) мощность, затрачиваемую конькобежцем при равномерном движении.

1.137. Уклон участка шоссе равен 0,005. Опускаясь под уклон при выключенном двигателе, автомобиль движется равномерно со скоростью 60 км/ч. Какова должна быть мощность двигателя автомобиля, чтобы он мог подниматься на такой же подъем с той же скоростью? Масса автомобиля 1,5 т.

1.138. Локомотив массой  $m$  начинает двигаться со станции так, что его скорость меняется по закону  $v = a\sqrt{s}$ , где  $a$  – постоянная,  $s$  – пройденный путь. Найдите суммарную работу сил, действующих на локомотив за время  $t$  после начала движения.

1.139. Система состоит из двух последовательно соединенных пружин с коэффициентами жесткости  $k_1$  и  $k_2$ . Определите минимальную работу, которую необходимо совершить, чтобы растянуть эту систему на  $\Delta x$ .

1.140. Идеально упругий шарик движется вверх и вниз в однородном поле тяготения, отражаясь от пола по законам упругого удара. Найдите связь между средними по времени значениями его кинетической  $E_k$  и потенциальной  $E_p$  энергиями.

1.141. 1. Небольшое тело соскальзывает вниз по наклонному скату, переходящему в мертвую петлю радиусом  $R$  (рис. 1.38). На какой высоте  $h_1$  упадет тело, если начальная его высота равна  $h$ ? Трение ничтожно мало. 2. Какой должна быть начальная высота  $h_2$  чтобы тело сделало полную петлю? 3. В кольце мертвой петли симметрично по отношению к вертикали сделан вырез с углом  $\alpha = 60^\circ$ . Какова должна быть начальная высота  $h_3$ , чтобы тело, пролетев вырез вернулось снова в кольцо мертвой петли?

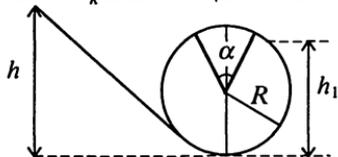


Рис. 1.38

полную петлю? 3. В кольце мертвой петли симметрично по отношению к вертикали сделан вырез с углом  $\alpha = 60^\circ$ . Какова должна быть начальная высота  $h_3$ , чтобы тело, пролетев вырез вернулось снова в кольцо мертвой петли?

**1.142.** Шарик массой  $m$ , привязанный к нити, вращается в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью  $v_0$ . Чему равна его кинетическая энергия  $E_k$  в системе отсчета, движущейся прямолинейно со скоростью  $\bar{v}_0$ ? Почему происходит изменение кинетической энергии тела в этой системе отсчета?

## 1.4. ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

### Законы сохранения энергии и импульса для системы материальных точек

**1.143.** Две одинаковые невзаимодействующие частицы движутся в межгалактическом пространстве навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями. Где находится центр масс системы? Как изменяется его положение в пространстве? Чему равны: а) импульс системы; б) кинетическая энергия системы; в) полная энергия системы? Как изменятся ответы, если существует взаимодействие между частицами?

**1.144.** С какой скоростью должна двигаться система отсчета, чтобы полный импульс замкнутой системы в ней был равен нулю?

**1.145.** Система отсчета, в которой покоится центр масс данной системы частиц (система центра масс), движется поступательно со скоростью  $v$  относительно инерциальной системы отсчета  $K$ . Масса системы частиц равна  $m$ , ее полная энергия в системе центра масс  $E$ . Определите полную энергию этой системы частиц в  $K$ -системе отсчета.

**1.146.** Артиллерийский снаряд, запущенный со скоростью  $\bar{v}_0$  под углом  $\alpha_0$  к горизонту, разрывается в воздухе. Как движется центр масс системы осколков?

**1.147.** Плот массой  $M$  с находящимся на нем человеком массой  $m$  неподвижен в пруду. Человек переходит с одного конца плота на другой. Почему при этом плот движется относительно воды? Как изменяется положение центра масс системы?

**1.148.** Какую работу надо совершить, чтобы тонкий столб длиной  $d$  и массой  $m$  перевести из горизонтального положения в вертикальное?

**1.149.** Через невесомый блок перекинута нерастяжимая легкая нить, к концу которой прикреплены грузы массами  $m_1$  и  $m_2$  ( $m_1 > m_2$ ). В отсутствие удерживающих сил система грузов приходит в движение с постоянным ускорением. Является ли эта система замкнутой? Меняется ли ее полная механическая энергия? Как движется центр масс этой системы? Какие силы являются внешними, какие внутренними?

**1.150.** Определите положение центра масс систем тел, показанных на рисунках 1.39 а, б, в.

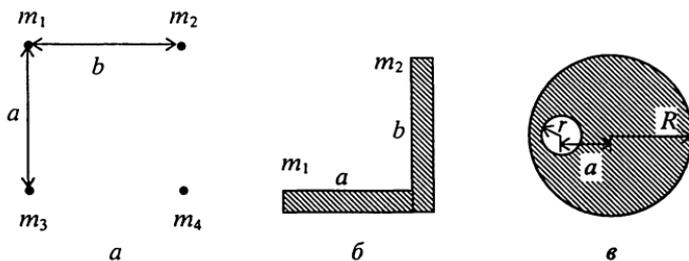


Рис. 1.39

**1.151.** Определите положение центра масс пластинки, имеющей форму полудиска радиусом  $R$ .

**1.152.** Однородный круглый конус имеет высоту  $h$ . На каком расстоянии от вершины находится его центр масс?

**1.153.** Определите положение центра масс тела, имеющего форму полушара радиусом  $R$ .

**1.154.** Замкнутая система состоит из двух частиц массами  $m_1$  и  $m_2$ , которые движутся со скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , составляющими прямой угол друг с другом. Найдите в системе отсчета, связанной с их центром масс: а) импульс каждой частицы, б) суммарную кинетическую энергию обеих частиц.

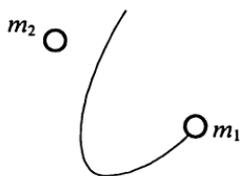


Рис. 1.40

**1.155.** Две взаимодействующие частицы образуют замкнутую систему, центр масс которой покоится. На рисунке 1.40 показаны положения обеих частиц в некоторый момент времени и траектория первой частицы. Постройте траекторию второй частицы, если  $m_2 = m_1/2$ .

**1.156.** Лодка массой 130 кг неподвижна в стоячей воде. Находящийся в ней человек массой 80 кг переходит с одного конца лодки на другой. При этом переходе лодка смещается относительно дна на 80 см. Пренебрегая сопротивлением воды, определите длину лодки.

**1.157.** Две лодки идут навстречу параллельными курсами. Когда лодки находятся друг против друга, с каждой лодки во встречную перебрасывается мешок массой  $m = 80$  кг, в результате чего первая лодка останавливается, а вторая идет со скоростью  $v_2 = 8,5$  м/с в прежнем направлении. Каковы были скорости лодок до обмена мешками, если массы лодок с грузом равны  $m_1 = 500$  кг и  $m_2 = 1$  т соответственно?

**1.158.** Снаряд разрывается в верхней точке, траектории на высоте  $h = 19,6$  м на две одинаковые части. Через время  $\tau = 1$  с после взрыва одна часть падает на землю под тем местом, где произошел взрыв. На каком расстоянии  $s_2$  от места взрыва упадет вторая часть снаряда, если первая упала на расстоянии  $s_1 = 1000$  м от места выстрела? По ка-

кой траектории двигается центр масс снаряда? Найдите положение центра масс системы и координаты второго осколка в тот момент, когда первый осколок упадет на землю. Начало координат находится в точке выстрела.

**1.159.** Пушка массой  $M$  начинает свободно скользить вниз по гладкой наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом. Когда пушка прошла путь  $l$ , был произведен выстрел, в результате которого снаряд массой  $m$  вылетел в горизонтальном направлении, а пушка остановилась (рис. 1.41). Определите скорость снаряда.

**1.160.** Замкнутая цепочка (рис. 1.42) массой  $m$  соединена нитью с концом вертикальной оси центробежной машины, которая вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . При этом нить составляет угол  $\alpha$  с вертикалью. Найдите расстояние от центра цепочки до оси вращения и силу натяжения нити.

**1.161.** Однородный стержень длиной  $l$  равномерно вращается вокруг закрепленной оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его центр. При какой угловой скорости вращения  $\omega$  стержень еще не разрывается под действием внутренних напряжений, возникающих при вращении? Максимальная сила натяжения, отнесенная к единице площади поперечного сечения стержня, равна  $T$ . Плотность материала стержня  $\rho$ .

**1.162.** На концах однородного стержня насажены два одинаковых шара. Стержень бросают, причем в начальный момент один из шаров движется со скоростью  $v_1 = 32$  м/с по направлению, составляющему угол  $\alpha = 60^\circ$  с горизонтом, а другой шар движется в прямо противоположном направлении со скоростью  $v_2 = 4$  м/с. На какую высоту над начальным уровнем поднимается середина стержня?

**1.163.** Две пластины одинаковой массы  $m$  соединены невесомой пружиной жесткостью  $k$  (рис. 1.43). С какой силой нужно надавить на верхнюю пластину, чтобы, двигаясь вверх после прекращения действия силы, верхняя пластина приподняла нижнюю? На какую высоту  $h$  поднимется центр масс этой системы, если сжатие пружины в начальном положении  $\Delta l = 7 mg/k$ ?

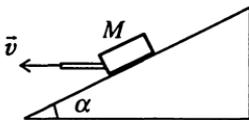


Рис. 1.41

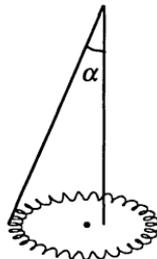


Рис. 1.42

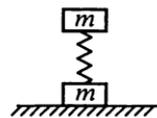


Рис. 1.43

1.164. На гладкой горизонтальной поверхности находится тело  $1$  массой  $M$  и на нем небольшая шайба  $2$  массой  $m$  (рис. 1.44). Шайбе сообщили в горизонтальном направлении скорость  $\vec{v}$ . На какую высоту (по сравнению с первоначальным уровнем) поднимется шайба после отрыва от тела  $1$ ? Трением пренебречь.

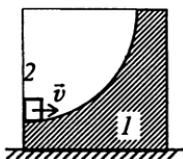


Рис. 1.44

1.165. На гладкой горизонтальной поверхности находятся два тела  $1$  и  $2$  массой  $m_1$  и  $m_2$  каждое соединенные невесомой пружиной жесткостью  $k$  (рис. 1.45). Тело  $2$  переместили влево на небольшое расстояние  $x$  и отпустили. Как будет двигаться эта система тел? Меняется ли полная механическая энергия системы? Найдите скорость центра масс системы после отрыва тела  $1$  от стенки.

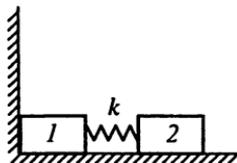


Рис. 1.45

1.166. На гладкой горизонтальной плоскости находятся два бруска, соединенные невесомой пружиной жесткостью  $k$  и длиной  $l_0$  в недеформированном состоянии. На один из брусков начали действовать постоянной силой  $\vec{F}$ , направленной горизонтально. Найдите максимальное и минимальное расстояния между брусками при дальнейшем движении системы, если массы брусков: а) одинаковы; б) равны  $m_1$  и  $m_2$  и сила  $\vec{F}$  приложена к бруску массой  $m_2$ .

### Упругие и неупругие столкновения

1.167. В каком случае выделится большая энергия при неупругом соударении двух одинаковых тел: если оба тела движутся с одинаковыми скоростями  $v$  навстречу друг другу, или когда одно тело движется со скоростью  $2v$ , а другое покоится? Чему равны кинетическая энергия и импульс системы после столкновения в обоих случаях?

1.168. На тележке (рис. 1.46) закреплен барабан со свободно (без трения) вращающимся диском. Масса тележки с барабаном  $M$ . В барабан один раз в точку  $A$ , а другой – в точку  $B$  ударяет пуля массой  $m$ , летящая горизонтально со скоростью  $v$ . В каком случае тележка приобретает большую скорость? Рассмотрите энергетические соотношения в обоих случаях.

1.169. Два тела массами  $m_1$  и  $m_2$  движутся навстречу друг другу со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Определите, как будут двигаться тела после лобового

го упругого соударения в следующих частных случаях: а)  $v_1 = 0, v_2 = 0, m_1 = m_2$ ; б)  $v_1 = 0, v_2 = 0, m_1 \gg m_2$ ; в)  $v_1 = 0, v_2 = 0, m_1 \ll m_2$ .

**1.170.** С гладкой наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом, соскальзывает с высоты  $h$  небольшое тело. Как будет двигаться тело, если в конце наклонной плоскости оно встречает: а) вполне упругую горизонтальную плоскость; б) горизонтальную плоскость неупругую, но гладкую?

**1.171.** Шар 1 массой  $m_1$ , летящий со скоростью  $\vec{v}_1$ , испытывает лобовое упругое соударение с покоящимся шаром 2 массой  $m_2$  (рис. 1.47). Как изменяются при этом проекции скоростей шаров на оси  $X$  и  $Y$ ?

**1.172.** Движущаяся частица испытывает упругое столкновение с покоящейся частицей такой же массы. Докажите, что после нелобового соударения частицы разлетятся под прямым углом друг к другу. Как будут двигаться частицы после лобового столкновения?

**1.173.** Докажите, что изменение кинетической энергии тел при неупругом ударе зависит только от относительной скорости тел.

**1.174.** Два идеальных упругих шарика массами  $m_1$  и  $m_2$  движутся вдоль одной и той же прямой со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Во время столкновения шарики начинают деформироваться и часть кинетической энергии переходит в потенциальную энергию деформации. Затем деформация уменьшается и потенциальная энергия деформации вновь переходит в кинетическую. Найдите максимальное значение потенциальной энергии деформации.

**1.175.** На гладком горизонтальном столе лежит шар массой  $m_1$ , соединенный с пружиной жесткостью  $k$ ; второй конец пружины закреплен (рис. 1.48). Этот шар испытывает лобовое упругое соударение с шаром массой  $m_2 < m_1$ , движущимся со скоростью  $\vec{v}_1$ . В какую сторону и с какой скоростью будет двигаться второй шар после соударения? Определите амплитуду колебаний первого шара после соударения.

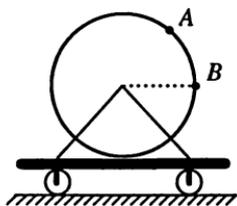


Рис. 1.46

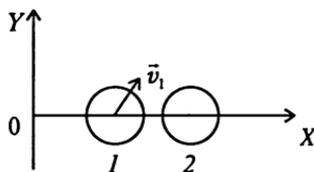


Рис. 1.47

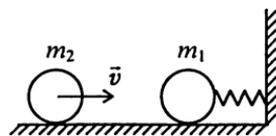


Рис. 1.48

**1.176.** Найдите импульс, получаемый стенкой при упругом ударе о нее тела массой  $m$ , скорость  $\vec{v}$  которого составляет угол  $\alpha$  с нормалью к стенке.

1.177. Определите изменение кинетической энергии  $\Delta E_k$  и импульса  $\Delta p$  тела, движущегося со скоростью  $\vec{v}$ , при упругом ударе его о стенку, движущуюся равномерно со скоростью  $\vec{u}$ . При каком соотношении между скоростью тела и скоростью стенки ударившееся о нее тело остановится?

1.178. Определите долю кинетической энергии, теряемую частицей массой  $m_1$  при упругом столкновении ее с неподвижной частицей массой  $m_2$ , если после столкновения частица продолжает двигаться в прежнем или прямо противоположном направлении. При каком соотношении масс  $m_1/m_2$  потеря энергии максимальная? Используя полученные результаты, объясните, почему в ядерных реакторах для замедления нейтронов используется их рассеяние на ядрах легких (дейтерий, углерод), а не тяжелых атомов.

1.179. Каков максимальный угол  $\theta$  рассеяния  $\alpha$ -частицы и дейтрона при упругом рассеянии их на водороде?

1.180. Альфа-частица, имеющая скорость  $\vec{v}_0$ , испытывает упругое соударение с неподвижным ядром и летит под углом  $90^\circ$  к первоначальному направлению движения. При каком соотношении масс  $\alpha$ -частицы  $m$  и ядра  $M$  это возможно? Определите скорости  $\alpha$ -частицы и ядра после столкновения. Определите угол  $\theta$  между направлением скорости ядра и первоначальным направлением скорости  $\alpha$ -частицы. Как изменяется положение центра масс этой системы в процессе соударения?

1.181. Быстро движущаяся молекула газа ударяется о другую молекулу того же газа, скорость которой в момент удара ничтожно мала. После удара молекулы летят в разные стороны. Покажите, что угол между направлениями скоростей молекул после удара: а) составляет  $90^\circ$ , если удар был упругим (т.е. внутренняя энергия молекул не изменилась в результате удара); б) меньше  $90^\circ$ , если удар был неупругим, т.е. энергия, зависящая от внутреннего состояния молекул, хотя бы у одной из них увеличилась (молекула перешла в возбужденное состояние); в) больше  $90^\circ$ , если внутренняя энергия какой-либо молекулы уменьшилась (молекула из возбужденного перешла в нормальное состояние).

1.182. Три одинаковых упругих шара висят, касаясь друг друга на трех параллельных нитях одинаковой длины, так что центры масс шаров лежат в углах равностороннего треугольника. Один из шаров отклоняют по направлению, перпендикулярному к прямой, соединяющей центры двух других шаров, и отпускают. Шар приобретает скорость  $\vec{v}$ . Каковы скорости всех шаров после удара?

1.183. Система состоит из двух шариков 1, 2 массами  $m_1$  и  $M$ , соединенных между собой невесомой пружиной жесткостью  $k$ . Третий шарик массой  $m$ , движущийся вдоль оси пружины со скоростью  $\vec{v}$ , претерпевает упругое столкновение с шариком 1 (рис. 1.49). До удара система

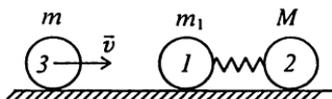


Рис. 1.49

- в) амплитуду колебаний одного шарика относительно другого; г) скорость после удара шарика 3.

покоилась, а пружина не была деформирована. Считая шарики абсолютно жесткими, определите: а) кинетическую энергию движения системы как целого после столкновения; б) внутреннюю энергию системы;

### Реактивное движение

**1.184.** Поливальная машина выбрасывает воду по ходу и против хода автомобиля. Какой характер движения автомобиля наблюдался бы в этих случаях, если бы двигатель не работал? Как в действительности расположены трубы у машины?

**1.185.** Многоступенчатая и одноступенчатая ракеты имеют одинаковую начальную массу и одинаковый запас горючего. У какой ракеты конечная скорость будет больше? Почему?

**1.186.** Каким образом ракета может изменять направление скорости своего движения?

**1.187.** Изменяются ли перегрузки, которые испытывают космонавты, по мере разгона ракеты (силой тяжести пренебречь)?

**1.188.** Тележка с песком движется по горизонтальной поверхности под действием постоянной силы  $\vec{F}$ , совпадающей по направлению с вектором скорости тележки. При этом песок высыпается через отверстие в дне, и масса песка уменьшается с постоянной скоростью  $\mu$ . Найдите ускорение и скорость тележки в момент времени  $t$ , если при  $t = 0$  тележка с песком имела массу  $m_0$  и ее скорость была равна нулю. Трением пренебречь.

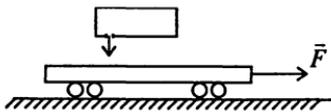


Рис. 1.50

**1.189.** Платформа массой  $m_0$  начинает двигаться вправо под действием постоянной силы, направленной горизонтально (рис. 1.50). Из неподвижного бункера на нее насыпается песок. Масса песка увеличивается с постоянной скоростью  $\mu$ . Найдите зависимость от времени скорости и ускорения платформы в процессе погрузки. Трением пренебречь.

Найдите зависимость от времени скорости и ускорения платформы в процессе погрузки. Трением пренебречь.

**1.190.** Ракета движется в отсутствие внешних сил, выпуская непрерывную струю газа со скоростью  $\vec{u}$ , постоянной относительно ракеты. Определите скорость ракеты  $\vec{v}$  в момент, когда ее масса равна  $m$ , если в начальный момент она имела массу  $m_0$  и скорость ее была равна нулю.

**1.191.** Оцените, каким запасом топлива должна обладать ракета, работающая на химическом топливе, обеспечивающем скорость струи газа  $u = 4$  км/с, чтобы: а) корабль мог приобрести первую космическую скорость; б) корабль мог покинуть солнечную систему.

**1.192.** Для путешествий к звездам требуются скорости, сравнимые со скоростью света. Оцените перспективность использования ракет на химическом топливе для достижения звездных миров. Допустите, что скорость истечения газа  $u = 10$  км/с (что для химического топлива сильно завышено) и ракета должна иметь скорость  $v = 0,25c$ . Определите отношение стартовой массы ракеты  $m_0$  к ее массе после достижения указанной скорости.

**1.193.** Космический корабль массой  $m_0$  движется в отсутствие внешних сил с постоянной скоростью  $\vec{v}_0$ . Для изменения направления скорости включили реактивный двигатель, который стал выбрасывать струю газа с постоянной относительно корабля скоростью  $\vec{u}$ , все время перпендикулярной к направлению движения корабля. В конце работы двигателя масса корабля стала равной  $m$ . На какой угол  $\alpha$  изменилось направление движения корабля за время работы двигателя?

**1.194.** Найдите связь между массой ракеты  $m(t)$ , достигнутой ею скоростью  $v(t)$  и временем  $t$ , если ракета движется вертикально вверх в поле тяготения Земли. Скорость газовой струи относительно ракеты считать постоянной. Соппротивление воздуха и изменение ускорения свободного падения с высотой не учитывать. Какую массу газов  $\mu(t)$  должна ежесекундно выбрасывать ракета, чтобы оставаться неподвижной относительно Земли?

## 1.5. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА

### Момент силы, момент импульса, момент инерции

**1.195.** Определите момент импульса материальной точки относительно центра  $O$ , если она: а) совершает движение по окружности с постоянной скоростью  $v$ ; б) движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $v$ .

**1.196.** Некоторая планета движется в поле тяготения Солнца по эллиптической траектории. Относительно какой точки гелиоцентрической системы отсчета момент импульса планеты будет сохраняться во времени? Будет ли при этом сохраняться импульс планеты?

**1.197.** На тело, которое может вращаться вокруг неподвижной оси  $Z$ , действуют силы  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ ,  $\vec{F}_3$  (рис. 1.51). Определите моменты этих сил относительно оси  $Z$ .

1.198. Две материальные точки взаимодействуют с силами  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , подчиняющимися третьему закону Ньютона ( $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ ). Определите момент этих сил относительно некоторого центра  $O$ .

1.199. Небольшое тело массой  $m$ , подвешенное на нити, равномерно движется по горизонтальной окружности радиусом  $r$  (рис. 1.52). Как направлен вектор момента импульса тела  $\vec{L}$  относительно точки подвеса  $A$  в различные моменты времени? Что можно сказать о проекции  $L_z$ . Как направлены моменты силы тяжести и силы натяжения нити относительно точки  $A$  и оси  $Z$ ?

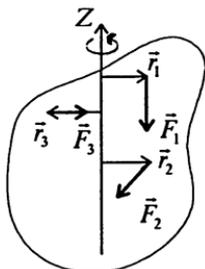


Рис. 1.51

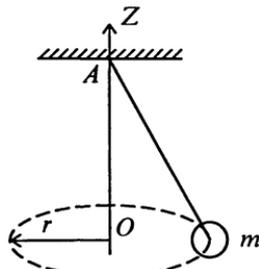


Рис. 1.52

1.200. Чему равна и как направлена сила трения сцепления при равномерном качении колеса по горизонтальной поверхности?

1.201. Колесо катится по горизонтальной поверхности замедленно из-за наличия сил трения. Как направлена сила трения?

1.202. Два цилиндра, сплошной и полый, одинаковой массы и радиуса, вращаются вокруг оси, совпадающей с осью симметрии, с угловой скоростью  $\omega$ . Какой цилиндр остановить труднее?

1.203. Два шара радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 \gg R_2$ ) скатываются с наклонной плоскости. Можно ли использовать модель материальной точки для описания движения какого-либо из этих шаров?

1.204. Определите моменты инерции следующих фигур относительно указанных осей: 1. Плоская прямоугольная пластинка массой  $m$  с линейными размерами  $a$  и  $b$  вращается вокруг:

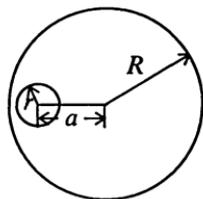


Рис. 1.53

а) оси, перпендикулярной плоскости пластины и проходящей через ее центр; б) оси, лежащей в плоскости пластины, проходящей через ее центр и параллельной одной из ее сторон. 2. Диск массой  $m$  и радиусом  $r$  вращается вокруг: а) оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его край; б) оси, лежащей в плоскости диска на расстоянии  $a$  от его центра. 3. Диск с вырезом (рис 1.53) вращается вокруг

оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр выреза. Плотность материала диска  $\rho$ , толщина  $h$ , радиус диска  $R$ , радиус выреза  $r$ . Расстояние между центрами диска и выреза  $a$ . 4. Шар радиусом  $r$  вращается вокруг оси, проходящей через его центр. 5. Цилиндр радиусом  $r$  и массой  $m$  вращается вокруг оси, проходящей вдоль его образующей.

**1.205.** Определите моменты инерции следующих фигур относительно осей, указанных на рисунке 1.54: а) тонкого стержня массой  $m$  и длиной  $l$ , расположенного под углом  $\alpha$  к оси. Ось проходит на расстоянии  $a$  от одного из концов стержня; б) крестовины с грузами. Длина стержней  $l$ , масса  $m_1$ , грузы массами  $m_2$  расположены на расстоянии  $a$  от оси, которая проходит через центр сплошного цилиндра радиусом  $r$  и массой  $m$ ; в) тонкого равнобедренного треугольника массой  $m$ , с длиной стороны  $a$ . Рассмотрите два случая: ось расположена в плоскости треугольника и проходит через его вершину параллельно противоположной стороне треугольника, ось проходит через центр треугольника перпендикулярно его плоскости; г) велосипедного колеса (в центре колеса находится цилиндр радиусом  $r_1$  и массой  $m_1$ , длина спицы  $d$ , масса  $m_2$ , число спиц  $N$ , радиус обода  $R$ , масса обода  $m_3$ ; в гнезде на ободу укреплен шарик массой  $m_4$  радиусом  $r_2$ ). Ось проходит через центр колеса, перпендикулярно его плоскости.

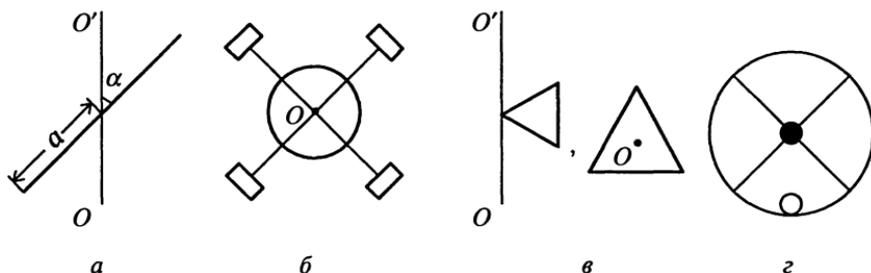


Рис. 1.54

**1.206.** В одной из ранних классических моделей электрон рассматривался как вращающийся шарик массой  $m$ , однородно заполняющей сферу радиусом  $r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2}$ , где  $e$  – заряд электрона. Собственный момент импульса (спин) электрона равен  $h/2$  ( $h$  – постоянная Планка). Покажите, что такая модель противоречит теории относительности.

**1.207.** Оцените момент импульса колеса велосипеда (для взрослых), едущего со скоростью 30 км/ч. Какой момент силы надо приложить, чтобы повернуть руль на 1 рад за 0,1 с?

## Уравнение моментов

**1.208.** Запишите уравнения динамики для движения системы тел в случаях, изображенных на рисунке 1.55, *a* – *д*. Определите линейные ускорения движущихся тел.

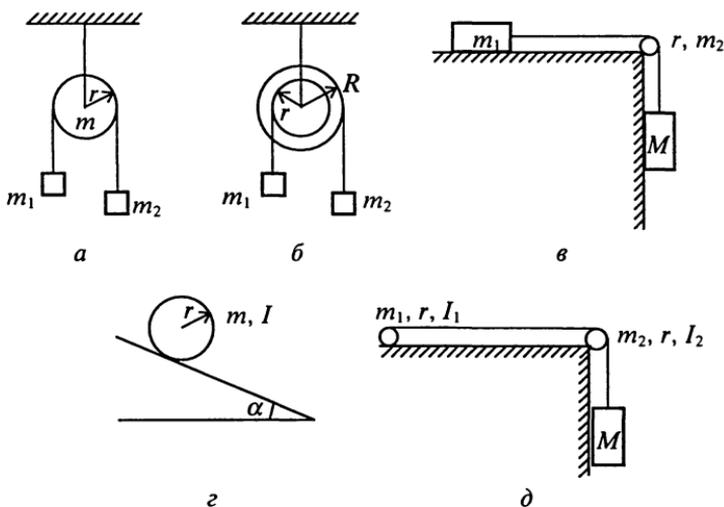


Рис. 1.55

**1.209.** На рисунке 1.56 изображена схема демонстрационного прибора (диск Максвелла). На валик радиусом  $r$  и массой  $m$  наглухо насажен диск радиусом  $R$  и массой  $M$ . К валику прикреплены нити одинаковой длины, при помощи которых прибор подвешивается к штативу. На валик симметрично наматываются нити в один ряд, благодаря чему диск поднимается на высоту  $h$ . Затем диск отпускается.

1. Определите ускорение, с которым будет двигаться центр масс.
2. Чему равна сила натяжения нитей при движении тела?
3. Чему равна кинетическая энергия диска и скорость его центра масс в тот момент, когда нити раскрутятся?
4. Пусть штатив, на котором укреплены нити, поднимается так, что диск при движении вниз все время остается на месте. Какова сила натяжения нитей в этом случае? С каким ускорением при этом необходимо поднимать штатив?

**1.210.** С каким ускорением будет опускаться диск (см. задачу 1.209), если в валик свободно (без трения) через отверстие в нем вставить стержень и к нему на нитях подвесить тело массой  $m$  (рис. 1.57). Массой нитей и стержня пренебречь.

1.211. На ступенчатый цилиндрический блок намотаны в противоположных направлениях две невесомые нити, на концах которых находятся грузы массами  $m_1$  и  $m_2$  (рис. 1.58). Найдите угловое ускорение блока, силы натяжения нитей и силу давления на ось блока, если масса блока  $m_3$ , момент инерции его  $I$  и радиусы ступеней блока  $R_1$  и  $R_2$ . С каким ускорением движется грузы?

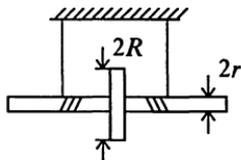


Рис. 1.56

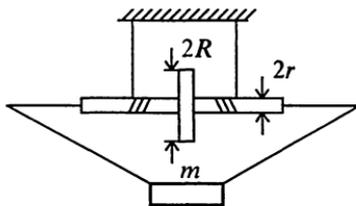


Рис. 1.57

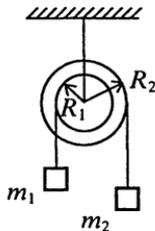


Рис. 1.58

1.212. По наклонной плоскости, образующей угол  $\alpha$  с горизонтом, скатывается без скольжения однородный шар. С каким ускорением движется центр масс шара? Чему равна сила трения? При каком угле  $\alpha$  движение без скольжения невозможно, если коэффициент трения скольжения  $\mu = 0,5$ ?

1.213. На горизонтальной поверхности лежит катушка ниток. Момент инерции катушки  $I$ . С каким ускорением будет двигаться ось катушки, если тянуть за нитку с силой  $\vec{F}$ , направленной под углом к горизонту (рис. 1.59)? Каким образом надо тянуть за нитку, чтобы катушка двигалась в сторону натянутой нити? Катушка катится по поверхности стола без скольжения. Найдите силу трения.

1.214. С каким ускорением движется вдоль плоскости, наклоненной под углом  $\alpha$  к горизонту, центр масс доски, положенной на два цилиндра? Масса доски равна массе каждого цилиндра. Цилиндры сплошные.

1.215. К концу веревки, намотанной на сплошной цилиндр радиусом  $r$  и массой  $m_1$ , привязан груз массой  $m_2$ . Веревка переброшена через блок (рис. 1.60). С каким ускорением движется груз? Выясните условия, при которых качение цилиндра будет происходить без скольжения. Момент инерции блока  $I$ , радиус блока  $r$ . Коэффициент трения скольжения  $\mu$ .

1.216. Два одинаковых сплошных цилиндра массой  $m$  каждый находятся на горизонтальной поверхности и соприкасаются по образующей. С левого цилиндра сматывают нить, приложив к ней в горизонтальном направлении силу  $\vec{F}$  (рис. 1.61). Считая, что цилиндры

движутся по поверхности без проскальзывания и коэффициент трения между их поверхностями  $\mu$ , найдите ускорение центра масс цилиндров.

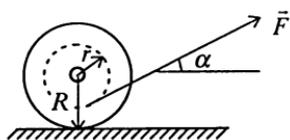


Рис. 1.59

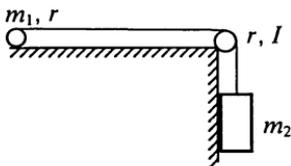


Рис. 1.60

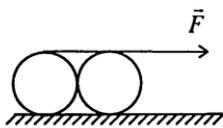


Рис. 1.61

**1.217.** Обруч радиусом  $r$  свободно скатывается с вершины неподвижной цилиндрической поверхности радиусом  $R > r$ . В какой точке поверхности цилиндра начинается скольжение обруча? Коэффициент трения скольжения между обручем и поверхностью  $\mu = 0,5$ .

**1.218.** Шарик радиусом  $R$  находится на пластинке, расположенной горизонтально. Пластинка движется с ускорением  $\bar{a}$ . При каком условии шарик останется неподвижным относительно пластинки?

**1.219.** С какой высоты  $H$  должен скатиться по наклонной плоскости однородный шарик, чтобы он мог без скольжения описать мертвую петлю по желобу радиусом  $R$ ? Радиусом шарика по сравнению с радиусом желоба пренебречь.

**1.220.** Сплошному однородному шару массой  $m$  и радиусом  $r$ , лежащему на горизонтальной поверхности, сообщили в начальный момент времени поступательную скорость  $v_0$  без вращения. Учитывая трение скольжения, но пренебрегая трением качения, определите угловую скорость шара, когда его движение перейдет в чистое качение. Какую работу совершит сила трения скольжения?

**1.221.** Сплошной однородный шар радиусом  $r$ , вращающийся вокруг горизонтального диаметра с угловой скоростью  $\omega_0$ , ставится на горизонтальную поверхность без сообщения ему поступательного движения. Учитывая трение скольжения, но пренебрегая трением качения, найдите линейную скорость шара, когда его движение перейдет в чистое качение. Определите потери кинетической энергии на трение.

**1.222.** Вертикальный столб высотой  $l$  подпиливается у основания и падает на землю, поворачиваясь вокруг нижнего основания. Определите линейную скорость его верхнего конца в момент удара о землю.

**1.223.** Однородный стержень массой  $m$  и длиной  $l$  падает без начальной скорости из вертикального положения, вращаясь без трения вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через нижний конец стержня. Определите проекции на оси  $X$  и  $Y$  силы, с которой ось действует на стержень, когда он оказывается в горизонтальном положении.

**1.224.** Каким участком сабли следует рубить лозу, чтобы рука не чувствовала удара? Саблю считать однородной узкой пластинкой.

1.225. Гимнаст на перекладине выполняет большой оборот из стойки на руках, т.е. вращается, не сгибаясь, вокруг перекладины, под действием собственной силы тяжести. Оцените приближенно максимальную нагрузку на его руки, пренебрегая трением ладоней о перекладину.

1.226. Стержень ничтожной массы длиной  $l$  с двумя маленькими шариками массами  $m_1$  и  $m_2$  ( $m_1 > m_2$ ) на концах может вращаться вокруг оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Стержень приводят в горизонтальное положение и отпускают. Определите: а) угловое ускорение и силу давления на ось в начальный момент движения стержня; б) угловую скорость и силу давления на ось в момент прохождения стержнем положения равновесия.

### Закон сохранения момента импульса

1.227. Фигурист вращается вокруг своей оси. Как изменится его угловая скорость, если он переведет руки из положения «в сторону» в положение «вниз»? Изменится ли его кинетическая энергия?

1.228. На краю достаточно большого горизонтального диска, свободно вращающегося с частотой  $n$ , стоит человек массой  $m$ . Радиус диска и его момент инерции соответственно равны  $r$  и  $I$ . Как изменится частота вращения диска и его кинетическая энергия, если человек: а) перейдет от края диска к центру? б) пойдет по окружности радиусом  $r$  с постоянной скоростью  $v$  относительно диска? Размерами человека по сравнению с радиусом диска пренебречь.

1.229. Экспериментатор стоит на специальной табуретке и держит в руках вертикальную ось свободно вращающегося колеса, имеющего момент инерции  $I_1$  относительно этой оси. Колесо вращается в горизонтальной плоскости с угловой скоростью  $\omega$ . Табуретка устроена так, что она может свободно вращаться вокруг вертикальной оси (скамья Жуковского). Момент инерции табуретки и человека относительно вертикальной оси равен  $I_2$ , ось колеса и ось табуретки лежат на одной прямой. Как изменится кинетическая энергия всей системы, если экспериментатор повернет ось колеса: а) на  $180^\circ$ ; б) на  $90^\circ$ ?

1.230. Два груза 1 и 2 массой  $m$  каждый подвешены к концам невесомой нити. Нить перекинута через блок. Трение в оси блока отсутствует. Первоначально груз 2 двигался по окружности радиусом  $r_0$  на участке нити длиной  $l_0$ , причем  $r_0 \ll l_0$ . Какую работу надо совершить, чтобы, приложив силу к грузу 1, очень медленно поднять груз 2, укоротив при этом длину нити вдвое?

1.231. Оцените период вращения  $T$ , с каким стало бы вращаться Солнце, если бы оно превратилось в нейтронную звезду, имеющую среднюю плотность вещества  $\rho = 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. Средняя плотность вещества Солнца  $\rho_0 = 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а период его вращения  $T_0 = 2,2 \cdot 10^6$  с.

## Упругие и неупругие соударения твердых тел

**1.232.** Монета массой  $m$  и радиусом  $r$  вращается в горизонтальной плоскости вокруг своей вертикальной оси с угловой скоростью  $\omega$ . Монета вертикально падает на горизонтальный диск радиусом  $R$  и массой  $M$  на расстоянии  $a$  от центра и прилипает к нему. В результате диск приходит во вращательное движение вокруг своей оси. Запишите законы сохранения, выполняющиеся при этом соударении. Определите угловую скорость вращения диска после соударения.

**1.233.** Тонкий стержень массой  $m$  и длиной  $L$  подвешен за один конец и может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси. К той же оси подвешен на нити длиной  $l$  однородный шарик такой же массы. Шарик отклоняют на угол  $\varphi$  и отпускают. Как будут двигаться шарик и стержень после абсолютно упругого соударения? При какой длине нити шарик после удара о стержень остановится?

**1.234.** Однородная тонкая квадратная пластинка массой  $m_0$  (длина стороны  $a$ ) может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. В точку, находящуюся на расстоянии  $2/3a$  от оси, нормально к пластинке ударяется шар массой  $m$ , летевший со скоростью  $\vec{v}$ . Как будут двигаться пластинка и шар после соударения: а) абсолютно упругого; б) абсолютно неупругого?

**1.235.** Однородную тонкую квадратную пластинку массой  $m_0$  (длина стороны  $a$ ), которая может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, на расстоянии  $2/3a$  от оси пробивает пуля массой  $m$ , летевшая со скоростью  $\vec{v}$  нормально к пластинке. После соударения пуля летит со скоростью  $\vec{v}_1$  в том же направлении. Как будет двигаться пластинка после соударения?

**1.236.** Стержень массой  $M$  и длиной  $l$ , который может свободно вращаться вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через один из его концов, под действием силы тяжести переходит из горизонтального положения в вертикальное. Проходя через вертикальное положение, стержень нижним концом упруго ударяется о малое тело массой  $m$ , лежащее на гладком горизонтальном столе (рис. 1.62). Определите скорость тела после упругого соударения. Как будет двигаться стержень? Как будет двигаться стержень и тело после абсолютно неупругого соударения (тело прилипает к концу стержня)?

**1.237.** Два бильярдных шара катятся навстречу друг другу со скоростью  $v$  и упруго сталкиваются. Запишите законы сохранения, выполняющиеся при этом соударении.

**1.238.** Бильярдный шар катится без скольжения по горизонтальной поверхности со скоростью  $\vec{v}_1$  и ударяется о такой же покоящийся бильярдный шар, причем линия, соединяющая центры шаров, парал-

лельна скорости движения (удар центральный). Определите скорости обоих шаров после того, как их движения перейдут в чистое качение. Какое количество теплоты выделится при ударе? Удар считать абсолютно упругим. Потерей энергии на трение качения пренебречь.

**1.239.** Большой однородный свинцовый шар массой  $M$  лежит на плоской горизонтальной поверхности. Небольшая пуля массой  $m$ , летевшая горизонтально со скоростью  $\bar{v}_0$  параллельно поверхности на расстоянии, равном радиусу шара, испытывает с шаром неупругое соударение и застревает в нем. Определите линейную скорость шара  $v$  после того, как его движение перейдет в чистое качение. При рассмотрении движения шара после соударения считать его однородным ( $m < M$ ).

**1.240.** Как надо ударить кием по бильярдному шару, чтобы сила трения шара о сукно бильярдного стола заставила его двигаться ускоренно, замедленно, равномерно? Предполагается, что удар наносится горизонтально в вертикальной плоскости, проходящей через центр бильярдного шара.

**1.241.** Как надо ударить кием по бильярдному шару, чтобы при столкновении с другим (неподвижным), шаром: а) оба шара стали двигаться вперед (удар с накатом); б) первый шар остановился, а второй двигался вперед; в) второй шар двигался вперед, а первый откатился назад (удар с оттяжкой)? Относительно направления и плоскости удара ввести те же предположения, что и в задаче 1.240. Оба шара расположены первоначально на малом расстоянии друг от друга.

**1.242.** Определите момент гироскопических сил, действующих на вал со стороны пропеллера, если самолет при скорости  $u = 300$  км/ч делает поворот радиусом  $R = 100$  м. Момент инерции пропеллера  $I = 7$  кг·м<sup>2</sup>, частота вращения  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>.

**1.243.** Массивный цилиндрический каток, который может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, катится со скоростью  $\bar{v}$  (рис. 1.63) по горизонтальной опорной плите, описывая вокруг оси  $OO'$  окружность радиусом  $R$ . Определите силу, с которой каток давит на опору, если радиус катка  $r$  и его масса  $m$  (такой каток используется в дисковых мельницах для измельчения различных материалов).

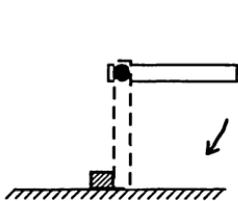


Рис. 1.62

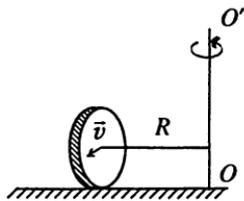


Рис. 1.63

## Статика твердого тела

**1.244.** На диск действует пара сил (рис. 1.64). Докажите, что момент сил, действующий на тело, не зависит от того, где проходит ось вращения. Рассмотрите несколько частных случаев (ось проходит через точки  $A, B, C$ ).

**1.245.** К ящику в точке  $B$  прикреплена веревка. Может ли ящик висеть на ней, касаясь вертикальной стены так, как показано на рисунке 1.65, в отсутствие сил трения?

**1.246.** Куб массой  $1\text{ т}$  опирается одним ребром на выступ  $D$  в вертикальной стене, а за другое ребро подвешен канатом  $AB$  к стене (рис. 1.66). Канат со стеной составляет угол  $45^\circ$ . Определите силу  $\vec{F}$ , с которой куб действует на выступ  $D$  и силу натяжения  $\vec{T}$  каната  $AB$ .

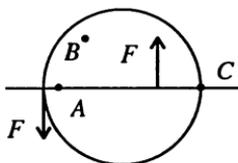


Рис. 1.64

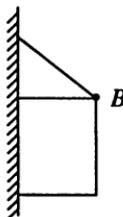


Рис. 1.65

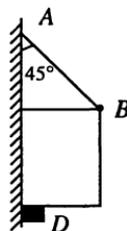


Рис. 1.66

**1.247.** Два шарика соединены невесомой нитью длиной  $l$  и размещены на цилиндрической гладкой поверхности радиусом  $R$  (рис. 1.67). При равновесии угол между вертикалью и радиусом, проведенным в точку, где находится шарик массой  $m_1$ , равен  $\alpha$ . Найдите массу второго шарика.

**1.248.** Однородная балка длиной  $l$  висела на четырех одинаковых канатах, закрепленных на расстоянии  $l/3$  друг от друга (рис. 1.68). Канат  $A$  удалили. Для уменьшения опасности разрыва предлагают удалить еще один канат. Разумно ли это предложение?

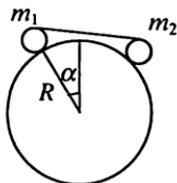


Рис. 1.67

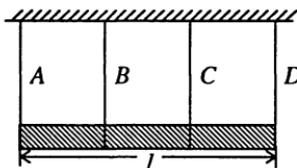


Рис. 1.68

**1.249.** В комнате у стены стоит лестница. Коэффициент трения нижнего конца лестницы о пол  $\mu_1$ , а коэффициент трения верхнего конца лестницы о стену  $\mu_2$ . При каких углах между лестницей и полом лестница не будет скользить?

**1.250.** Доска длиной  $l$  и массой  $m$  лежит на горизонтальной поверхности стола. Коэффициент трения между столом и доской  $\mu$ . Под край доски подкладывают каток и медленно сдвигают доску со стола, действуя силой, направленной горизонтально. Какую работу надо совершить, чтобы полностью сдвинуть доску со стола? Трением качения пренебречь. Считать, что доска не прогибается.

## 1.6. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**1.251.** «Загадка Эйнштейна». Когда Эйнштейн был ребенком, он задавал себе такой вопрос: «Пусть бегун смотрит на себя в зеркало, которое он держит перед собой в вытянутой руке. Если он бежит со скоростью света, сможет ли он увидеть себя в зеркале?» Рассмотрите этот вопрос в рамках теории относительности.

**1.252.** Три ракеты стартуют с ракетодрома с интервалом в год и движутся далее по одной прямой с одинаковой скоростью, равной  $1/2c$ . Командиры 1-й и 3-й ракет сверяют свои часы по радиосигналу со 2-й ракеты. Будут ли синхронизированы часы ракет с точки зрения наблюдателя, находящегося на Земле?

**1.253.** В классической физике из преобразований Галилея следует инвариантность длин отрезков и промежутков времени в различных системах отсчета. Сохраняется ли эта инвариантность в релятивистской физике?

**1.254.** Докажите, что преобразования Лоренца оставляют инвариантным интервал между двумя событиями в различных ИСО.

**1.255.** На рисунке 1.69 изображена пространственно-временная система координат. Абсцисса представляет пространственную координату, ордината – временную координату  $ct$ . Пусть некоторому событию соответствует начало координат. Покажите на рисунке области, которые: а) относятся к абсолютно прошлому этого события; б) относятся к абсолютно будущему этого события; в) причинно не связаны с этим событием. Что можно сказать о значении пространственно-временного интервала в этих областях?

**1.256.** На пространственно-временной диаграмме (рис. 1.70) показаны три события  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , которые произошли на оси  $X$  некоторой инерциальной системы отсчета. Найдите: а) промежуток времени между событиями  $A$  и  $B$  в системе отсчета, где оба события произошли в одной точке; б) расстояние между точками, где произошли события  $A$  и  $C$  в той системе отсчета, где они одновременны. С какой скоростью относительно заданной инерциальной системы отсчета движутся рас-

смаатриваемые в пунктах а) и б) системы? Могут ли события  $A$ ,  $B$  и  $A$ ,  $C$  быть связаны причинной связью?

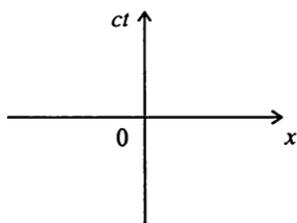


Рис. 1.69

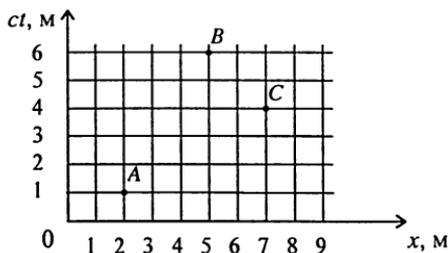


Рис. 1.70

**1.257.** Сохраняется ли в релятивистской динамике понятие абсолютно твердого тела?

**1.258.** Писатель-фантаст С. Лем (повесть «Астронавты») рассказывает о необычных ощущениях космонавтов в корабле, движущемся со скоростью  $v$ , близкой к скорости света, которые он связывает с увеличением массы тела при  $v \approx c$ . Прав ли писатель?

**1.259.** Стержень длиной  $l$  движется с релятивистской скоростью  $v$  вдоль оси  $X$  неподвижной системы отсчета. Что понимается под длиной движущегося стержня? Определите длину движущегося стержня в неподвижной системе отсчета.

**1.260.** Неподвижный в системе  $K$  наблюдатель может измерить длину движущегося стержня следующим образом. Пусть стержень ориентирован вдоль общей оси  $X, X'$  и покоится в системе  $K'$ . Наблюдателю из системы  $K$  известна скорость системы  $K'$   $v$  (а, следовательно, и стержня), у наблюдателя имеются часы, по которым он отмечает моменты  $t_1$  и  $t_2$  прохождения мимо него начала и конца стержня. Пусть  $t_1 - t_2 = \Delta t$ . Тогда наблюдатель в системе  $K$  считает, что длина стержня  $l$  равна  $v\Delta t$ . Покажите, что при таком определении длина

стержня равна  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  ( $l_0$  – длина покоящегося стержня).

**1.261.** Квадратная рамка движется со скоростью  $v \approx c$  относительно оси  $X$  некоторой системы отсчета. Определите угол между диагоналями в этой системе.

**1.262.** Плотность покоящегося тела равна  $\rho_0$ . Какова его плотность в системе отсчета, движущейся с релятивистской скоростью  $v$  относительно тела?

**1.263.** Концентрация электронов в неподвижном металлическом стержне равна  $n_0$ . Как меняется ее значение в системе отсчета, движущейся относительно стержня со скоростью  $v$ ?

1.264. Пи-мезон, имеющий собственное время жизни  $\tau_0$ , движется со скоростью  $v$  относительно некоторой системы отсчета. Какой путь пройдет  $\pi$ -мезон в этой системе?

1.265. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростью  $v_0 = 0,7c$  относительно лабораторной системы отсчета. Какова скорость сближения частиц: а) в лабораторной системе отсчета; б) в системе отсчета, связанной с одной из частиц?

1.266. Две релятивистские частицы движутся под прямым углом друг к другу со скоростью  $v_0$  относительно лабораторной системы отсчета. Найдите: а) скорость сближения частиц в лабораторной системе; б) их относительную скорость.

1.267. «Парадокс близнецов». Из двух братьев-близнецов  $A$  остается на Земле, а  $B$  отправляется в путешествие на межзвездном корабле, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света. Через пять лет по своим часам брат  $B$  возвращается обратно и находит брата  $A$  глубоким стариком: за время путешествия по часам на Земле прошло 50 лет. Возможно ли это?

1.268. «Война в космосе». Две ракеты, обладающие равными длинами покоя, проходят мимо друг друга с релятивистскими скоростями. Наблюдатель ракеты  $O$  располагает в хвостовой части своей ракеты орудием, ствол которого направлен поперек относительного движения ракет. В тот момент, когда точки  $A$  и  $A'$  (рис. 1.71, а) совпадают, наблюдатель ракеты  $O$  стреляет из своего орудия. В системе отсчета ракеты  $O$  лоренцеву сокращению подвергается пролетающая мимо ракета, так что наблюдатель ракеты  $O$  ожидает, что его снаряд не попадет в нее (рис. 1.72, б). Но в системе отсчета наблюдателя ракеты  $O'$  лоренцеву сокращению подвергается ракета  $O$ . Поэтому в тот момент, когда точки  $A$  и  $A'$  поравнялись друг с другом, наблюдатель ракеты  $O$  отмечает другую картину (рис. 1.72, в), и снаряд, очевидно, должен попасть в цель. Попадает ли на самом деле снаряд в цель или пролетает мимо? Дайте подробный ответ и укажите погрешности в постановке задачи.

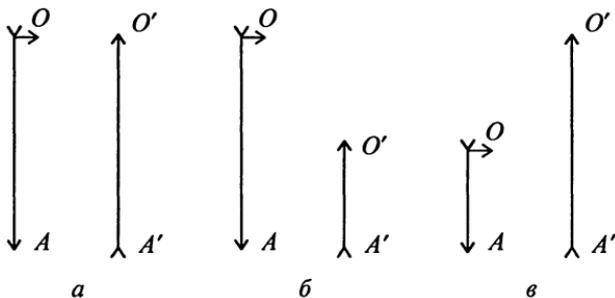


Рис. 1.71

**1.269.** Исходя из основного уравнения релятивистской динамики, установите, когда ускорение частицы совпадает по направлению с действующей на нее силой. Найдите коэффициенты пропорциональности между силой  $\vec{F}$  и ускорением  $\vec{a}$ , если: а) вектор силы  $\vec{F}$  перпендикулярен вектору  $\vec{v}$  скорости частицы; б) вектор силы  $\vec{F}$  параллелен вектору  $\vec{v}$  скорости частицы.

**1.270.** Какую работу надо совершить, чтобы изменить скорость релятивистской частицы от  $v_1$  до  $v_2$ ?

**1.271.** Определите, при какой скорости частицы ее кинетическая энергия равна энергии покоя.

**1.272.** Определите скорость частицы (заряд  $e$ , масса  $m$ ), прошедшей разность потенциалов  $U$ , если ее начальная скорость  $v_0 = 0$ . Рассмотрите классический и релятивистский случаи.

**1.273.** Электрон, движущийся с релятивистской скоростью  $v$ , влетает в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , направленной перпендикулярно скорости частицы. Определите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон в магнитном поле, и частоту обращения.

**1.274.** Частица с массой  $m_0$ , и кинетической энергией  $E_k$  налетает на покоящуюся частицу той же массы. Какой будет масса и скорость составной частицы, образовавшейся в результате соударения?

**1.275.** Две одинаковые частицы массой  $m_0$  движутся в лабораторной системе отсчета  $K$  навстречу друг другу с одинаковыми по модулю релятивистскими скоростями  $\vec{v}$  и испытывают неупругое столкновение. Какая энергия выделится при таком столкновении?

## 1.7. НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

**1.276.** Запишите второй закон динамики в инерциальной и неинерциальной системах отсчета для следующих случаев: а) маятник укреплен на диске, вращающемся с постоянной угловой скоростью; б) тело, находящееся на вращающемся диске, равномерно движется по радиусу или окружности.

**1.277.** Вращение Земли приводит к отклонению свободно падающих тел от направления отвеса. В какую сторону происходит это отклонение?

**1.278.** Тело брошено вертикально вверх с поверхности Земли. Вернется ли оно в ту же точку при падении на Землю?

**1.279.** Объясните влияние сил Кориолиса на движение рек в северном и южном полушариях (рассмотрите движение рек, текущих по параллелям и меридианам).

**1.280.** На плоскости с углом наклона  $\alpha$  лежит тело. Определите наименьшее значение коэффициента трения между телом и наклонной плоскостью, при котором тело не будет соскальзывать с наклонной плоскости, если плоскость движется: а) равномерно; б) равноускоренно. Решите задачу в инерциальной и неинерциальной системах отсчета.

**1.281.** Точка подвеса математического маятника длиной  $l$  колеблющегося в вертикальной плоскости, движется с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вверх. Определите период колебаний маятника.

**1.282.** Автомобиль трогается с места с постоянным ускорением  $a$ . Одна из дверей автомобиля открыта, и ее плоскость составляет угол  $90^\circ$  с кузовом автомобиля. За какой промежуток времени  $\Delta t$  дверь закроется? Центр масс двери находится на расстоянии  $d$  от петель двери автомобиля. Масса двери  $m$ , момент инерции  $I$ .

**1.283.** Какое максимальное ускорение может развить автомобиль с задней ведущей осью, если коэффициент трения колес о дорогу  $\mu$ , расстояние между осями автомобиля  $l$ , высота центра масс автомобиля над дорогой  $h$  и он расположен посередине колесной базы?

**1.284.** Тело массой  $m$  находится на экваторе на широте  $\varphi$ . Определите проекции на вертикальную и горизонтальную оси силы, действующей на тело, если оно: а) неподвижно; б) движется по параллели с запада на восток с постоянной скоростью  $v$ ; движется по меридиану с севера на юг с постоянной скоростью  $v$ .

**1.285.** В северном полушарии на широте  $60^\circ$  паровоз массой  $100$  т идет с юга на север со скоростью  $v = 72$  км/ч по железнодорожному пути, проложенному по меридиану. Определите модуль и направление силы, с которой паровоз действует на рельсы в направлении, перпендикулярном его движению.

**1.286.** На экваторе на рельсах стоит пушка. Рельсы направлены с запада на восток, и пушка может двигаться по ним без трения. Пушка стреляет вертикально вверх. Какую скорость  $\vec{v}_0$  будет иметь пушка после выстрела? Масса пушки  $M$ , масса снаряда  $m$ , длина ствола  $l$ . Считать, что снаряд движется в стволе с постоянным ускорением.

**1.287.** Стрелок и мишень расположены в диаметрально противоположных точках карусели радиусом  $5$  м, равномерно вращающейся вокруг вертикальной оси с частотой  $0,1\text{ с}^{-1}$ . Скорость пули  $300$  м/с. Пренебрегая линейной скоростью карусели по сравнению со скоростью пули, определите приближенно, под каким углом к диаметру карусели должен целиться стрелок, чтобы поразить мишень. Задачу рассмотрите как в инерциальной, так и во вращающейся системе отсчета, связанной с каруселью.

## 1.8. КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

### Собственные колебания

**1.288.** Рассмотрите качественные особенности колебательного движения следующих систем: а) тело на пружине; б) математический маятник в вязкой среде; в) ветки на дереве; г) человек на качелях; д) маятник в часах; е) подвешенное на пружине тело, на которое действует гармоническая сила. В чем сходство и каковы различия в протекании колебательных процессов в этих системах?

**1.289.** Составьте уравнение движения и определите собственную частоту колебаний системы для следующих случаев: а) математический маятник; б) физический маятник; в) деревянный брусок в форме параллелепипеда, плавающий на воде; г) тело, подвешенное к вертикально висящей пружине; д) жидкость в сообщающихся сосудах; е) маятниковые часы на ракете, движущейся вертикально вверх с постоянным ускорением; ж) маятник, укрепленный на тележке, которая движется горизонтально с постоянным ускорением.

**1.290.** Запишите закон движения тела, совершающего собственные колебания, при следующих начальных условиях: а) тело сместили из положения равновесия на величину  $x_0$  (скорость  $v_0 = 0$ ) и отпустили; б) в положении равновесия телу сообщили скорость  $v_0$ ; в) тело сместили из положения равновесия на величину  $x_0$  и сообщили скорость  $v_0$ . Зависит ли период колебаний от амплитуды?

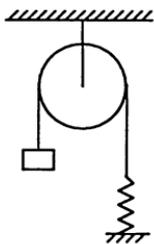


Рис. 1.72

**1.291.** Через неподвижный блок с моментом инерции  $I$  и радиусом  $R$  перекинута нить, к одному концу которой подвешен груз массой  $m$ . Другой конец нити привязан к пружине с закрепленным нижним концом (рис. 1.72). Чему равен период колебаний груза, если жесткость пружины равна  $k$ , а нить не может скользить по поверхности блока? При каких начальных смещениях груза  $x_0$  возникающие колебания перестают быть гармоническими?

**1.292.** Тонкий однородный стержень длиной  $l$  колеблется в вертикальной плоскости около горизонтальной оси, которая может перемещаться вдоль стержня. Определите зависимость периода колебаний от расстояния центра масс стержня до оси. Чему равен наименьший период колебаний?

**1.293.** Сплошной цилиндр радиусом  $r$  катится без скольжения по внутренней стороне полой цилиндрической трубы радиусом  $R$ . Докажите, что при малых отклонениях от положения равновесия цилиндра его колебания будут гармоническими. Определите собственную частоту колебаний такой системы.

**1.294.** Однородный диск радиусом  $r$  совершает малые колебания относительно горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей на расстоянии  $a$  от его центра. Определите период колебаний диска.

**1.295.** На доске лежит груз массой  $m = 0,1$  кг. Доска совершает гармонические колебания в вертикальном направлении с периодом  $T = 0,5$  с и амплитудой  $a = 2$  см. Определите силу, с которой груз действует на доску в различные моменты времени.

**1.296.** Шарик массой  $m$  подвешен на двух последовательно соединенных пружинах с жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ . Определите период вертикальных колебаний шарика.

**1.297.** Тело массой  $m$  прикреплено к двум пружинам с жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ , другие концы которых закреплены на неподвижных опорах (рис. 1.73). Чему равен период малых колебаний тела, выведенного из положения равновесия? Трением и массой пружин пренебречь.

**1.298.** На горизонтальной поверхности находится сплошной цилиндр массой  $m$  и радиусом  $r$ . К оси цилиндра прикреплены две одинаковые горизонтально расположенные пружины; другие концы пружин закреплены на стене (рис. 1.74). Жесткость каждой пружины  $k$ . Определите период малых колебаний цилиндра, возникающих при выведении его из положения равновесия. Качение цилиндра происходит без проскальзывания.

**1.299.** Чему равен период малых вертикальных колебаний шарика массой  $m = 40$  г, укрепленного на середине горизонтальной натянутой струны длиной  $l = 1,0$  м (рис. 1.75). Силу натяжения струны считать постоянной и равной  $F = 10$  Н.



Рис. 1.73

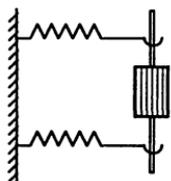


Рис. 1.74

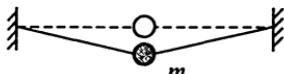


Рис. 1.75

**1.300.** Определите период колебаний ртути массой  $m = 200$  г, налитой в изогнутую трубку, правое колено которой составляет угол  $\theta = 30^\circ$  с вертикалью. Площадь сечения канала трубки  $S = 0,50$  см<sup>2</sup>. Вязкостью ртути пренебречь.

**1.301.** Тело массой  $m$  упало с высоты  $h$  на чашку пружинных весов (рис. 1.76). Массы чашки и пружины пренебрежимо малы, жесткость последней  $k$ . Упав на чашку, тело начинает совершать гармонические колебания в вертикальном направлении. Найдите амплитуду колебаний и их энергию.

**1.302.** Частица массой  $m$  находится в одномерном потенциальном поле, в котором ее потенциальная энергия зависит от координаты  $x$  по закону  $E_p(x) = \frac{a}{x^2} - \frac{b}{x}$ , где  $a$  и  $b$  – некоторые постоянные. Определите период малых колебаний частицы около положения равновесия.

**1.303.** Каков период колебаний груза массой  $m$ , подвешенного к двум пружинам  $k_1$  и  $k_2$  с помощью нити и блока (рис. 1.77). Нить и блок считать невесомыми.

**1.304.** Два шара, массы которых соответственно равны  $m_1 = 1,0$  кг и  $m_2 = 2,0$  кг, насажены на тонкий гладкий горизонтальный стержень. Шары связаны между собой легкой пружиной жесткостью  $k = 24$  Н/м (рис. 1.78). Левому шару сообщили начальную скорость  $v = 12$  м/с. Найдите: а) частоту колебаний системы в процессе движения; б) энергию и амплитуду колебаний.

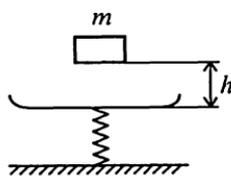


Рис. 1.76

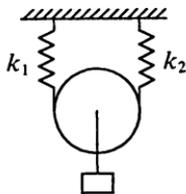


Рис. 1.77

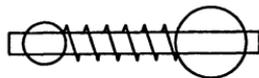


Рис. 1.78

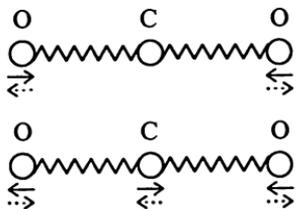


Рис. 1.79

**1.305.** Модель молекулы  $\text{CO}_2$  – три шарика, соединенные одинаковыми легкими пружинами и расположенные в положении равновесия вдоль одной прямой. Такая система может совершать продольные колебания двух типов, как показано стрелками на рисунке 1.79. Зная массы атомов, определите отношение частот этих колебаний.

### Свободные (затухающие) колебания

**1.306.** Начальная амплитуда колебаний маятника равна  $A_0 = 3$  см. Через промежуток времени  $t_1 = 10$  с она стала равной  $A_1 = 1$  см. Через сколько времени  $t_2$  амплитуда колебаний будет равна  $A_2 = 0,3$  см? Как изменяются смещение и скорость маятника в зависимости от времени, если частота колебаний  $f = 50$  Гц? Чему равен логарифмический декремент затухания такой системы?

**1.307** Каков логарифмический декремент затухания математического маятника длиной  $l = 0,8$  см, если его начальная амплитуда  $\varphi_0 = 5^\circ$ , а через промежуток времени  $t = 5$  мин амплитуда стала равной  $\varphi_1 = 0,5^\circ$ ? Как меняются смещение, скорость, кинетическая и потенциальная энергия в зависимости от времени? Чему равна добротность такой системы? Масса маятника  $m = 0,1$  кг.

**1.308.** Какова добротность осциллятора, у которого амплитуда смещения уменьшается в  $n = 2$  раза через каждые  $N = 110$  колебаний?

**1.309.** Определите добротность математического маятника длиной  $l = 50$  см, если за промежуток времени  $\tau = 5,2$  мин его полная механическая энергия уменьшилась в  $n = 4,0 \cdot 10^4$  раз.

**1.310.** 1. Упругое тело колеблется в среде, для которой логарифмический декремент затухания равен  $0,7$ . Возможны ли затухающие колебания этого тела в среде, коэффициент затухания в которой в  $10$  раз больше, чем в данной? 2. Решите эту задачу при условии, что декремент в данной среде равен  $0,6; 0,1$ .

**1.311.** Запишите уравнение горизонтального колебательного движения тела на пружине жесткостью  $k$  при наличии сил сухого трения  $F_{\text{тр}}$ . Чему равно изменение амплитуды колебаний ( $\Delta x$ ) за период, если сила трения мала? Начальная амплитуда колебаний  $x_0$ . Чему равен полный путь, который пройдет тело до остановки?

**1.312.** На горизонтальной плоскости лежит брусок массой  $m = 0,50$  кг, соединенный горизонтальной недеформированной пружиной со стенкой. Коэффициент трения бруска о плоскость  $\mu = 0,1$ . Жесткость пружины  $2,4$  Н/м, а ее масса пренебрежимо мала. Брусок сместили так, что пружина растянулась на  $x_0 = 3,0$  см, а затем отпустили. Найдите период колебаний бруска. Сколько колебаний совершит брусок до остановки?

## Вынужденные колебания

**1.313.** Запишите уравнение движения тела, совершающего вынужденные колебания. Получите его приближенное стационарное решение для следующих случаев: а)  $\omega \rightarrow 0$ ; б)  $\omega \rightarrow \omega_0$ ; в)  $\omega \rightarrow \infty$ . Как изменяются амплитуда и сдвиг фазы между смещением и вынуждающей силой при увеличении частоты?

**1.314.** Запишите полное решение дифференциального уравнения движения тела при вынужденных колебаниях. Через какое время движение можно считать установившимся? От каких параметров колеблющейся системы зависит это время? Почему?

**1.315.** Вычислите работу вынуждающей силы и силы трения за период колебаний. При каких условиях они максимальны?

**1.316.** Как изменяются кинетическая и потенциальная энергия тела при его свободных и вынужденных колебаниях?

**1.317.** Нарисуйте график зависимости амплитуды смещения (скорости, ускорения) от частоты вынуждающей силы при различных коэффициентах затухания системы. По виду резонансной кривой амплитуды смещения найдите добротность. При каких частотах наблюдается максимум амплитуды смещения (скорости, ускорения)?

**1.318.** В ведре несут воду. Почему после нескольких шагов вода начинает расплескиваться? Если на воду положить деревянный кружок, расплескивание прекращается. Почему?

**1.319.** При некоторой скорости вращения маховика швейной машины стол, на котором она стоит, иногда сильно раскачивается. Почему?

**1.320.** При какой скорости поезда математический маятник длиной  $l$ , подвешенный в вагоне движущегося поезда, особенно сильно раскачивается, если длина рельса между стыками  $a$ ?

**1.321.** Амплитуды скоростей вынужденных колебаний при частотах вынуждающей силы  $f_1 = 200$  Гц и  $f_2 = 300$  Гц равны между собой. Принимая, что амплитуда вынуждающей силы в обоих случаях одинакова, определите частоту, соответствующую максимуму скорости.

**1.322.** Амплитуды смещений вынужденных колебаний при частотах вынуждающей силы  $f_1 = 200$  Гц и  $f_2 = 300$  Гц равны между собой. Определите частоту, соответствующую максимуму смещения.

**1.323.** На графике зависимости амплитуды скорости от частоты вынуждающей силы провели прямую, параллельную оси абсцисс, на высоте, равной половине максимума амплитуды. Ширина резонансной кривой на этой высоте равна  $\Delta f = 20$  Гц. Определите коэффициент затухания и добротность этой системы, если собственная частота колебаний  $f_0 = 1,0$  кГц.

**1.324.** Тело подвешено на пружине и имеет собственный период колебаний  $T_0 = 0,5$  с. На тело действует направленная вертикально вынуждающая сила с амплитудой  $F_0 = 10^{-3}$  Н и сила сопротивления, пропорциональная скорости движения. Определите коэффициент затухания и добротность этой системы, если амплитуда колебаний смещения при резонансе  $A_p = 5$  см.

**1.325.** Некоторая резонансная кривая соответствует механической колебательной системе с логарифмическим декрементом затухания  $\delta = 1,6$ . Найдите для этой кривой отношение максимальной амплитуды смещения к амплитуде смещения при очень малой частоте.

**1.326.** Шарик массой  $m = 50$  г подвешен на невесомой пружинке жесткостью  $k = 20,0$  Н/м. Под действием вынуждающей вертикальной гармонической силы с частотой  $\omega = 25,0$  рад/с шарик совершает установившиеся колебания с амплитудой  $Y_m = 1,3$  см. При этом смещение шарика отстает по фазе от вынуждающей силы на  $\varphi = 3/4\pi$ . Определи-

те добротность данного осциллятора и работу вынуждающей силы за период колебаний.

**1.327.** На качелях, качающихся с небольшой угловой амплитудой  $\varphi_0$  сидит человек. Когда качели проходят положение равновесия, человек быстро встает, а в момент максимального отклонения снова садится. На сколько изменится угловая амплитуда качелей за период? Центр масс человека опускается и поднимается на высоту  $h$ . Длина веревок качелей  $l \gg h$ , а масса качелей пренебрежимо мала по сравнению с массой человека.

## 1.9. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В УПРУГИХ СРЕДАХ

**1.328.** Какие волны (поперечные или продольные) могут возбуждаться в газообразной, жидкой и твердой средах? Почему?

**1.329.** Волны в упругой среде возбуждаются: а) точечным вибратором в воздушной среде; б) большой плоской пластиной на поверхности жидкости; в) точечным вибратором на поверхности жидкости. Как отличаются зависимости  $\xi(r, t)$  для этих случаев? Учтите возможное затухание волн в среде.

**1.330.** Нарисуйте графики зависимости смещения  $\xi$ , скорости  $v$  и ускорения  $a$  колеблющейся точки среды от ее координаты  $x$  для двух моментов времени, отличающихся на  $\Delta t = T/4$ . Рассмотрите случай плоской поперечной волны. На графике  $\xi(x)$  укажите стрелками направление движения отдельных точек среды. В каких точках для соответствующих моментов времени развиваются наибольшие силы упругости? Нарисуйте график зависимости относительной деформации  $\frac{\partial \xi}{\partial x}$  от координаты точки  $x$  для тех же моментов времени.

**1.331.** Для тех же моментов времени, что и в задаче 1.330, постройте графики зависимости потенциальной и кинетической энергии от координаты. Чему равен средний за период поток энергии, переносимой волной через площадку  $dS$  упругой среды, перпендикулярную к направлению распространения волны?

**1.332.** В воду погружен вибратор, мембрана которого создает музыкальные звуки. Будет ли находящийся под водой пловец воспринимать такую же мелодию, какую он слышал в воздухе?

**1.333.** Может ли звук сильного взрыва на Луне, например извержения вулкана, быть слышен на Земле?

**1.334.** Игрушечный телефон состоит из двух коробок, соединенных натянутой ниткой или проволокой. Такое устройство позволяет переговариваться тихим голосом или даже шепотом на расстояниях в несколько десятков метров. Почему?

**1.335.** Почему при стрельбе пуля вылетает из ружья со свистом, а брошенная рукой летит бесшумно?

**1.336.** Может ли снаряд, выпущенный из орудия, опередить звук выстрела?

**1.337.** Почему человек с музыкальным слухом легко различает отдельные звуки при одновременном звучании нескольких струн рояля, хотя возникающее суммарное давление на барабанную перепонку существенно зависит не только от частоты отдельных звуков, но и от амплитуд и начальных фаз?

**1.338.** Сравните давления, вызывающие болевые ощущения в ухе, в статическом (например, при погружении в воду) и динамическом (при звуковых колебаниях барабанной перепонки) случаях?

**1.339.** Амплитуда звуковой волны в воздухе изменяется в  $10^4$  раз. Как изменяется громкость звука, воспринимаемая человеческим ухом?

**1.340.** Пуля пролетела со скоростью 600 м/с на расстоянии 5 м от человека. На каком расстоянии от человека была пуля, когда он услышал ее свист?

**1.341.** Два звука разнятся по уровню интенсивности на 1 дБ. Каково отношение интенсивностей?

**1.342.** Точечный изотропный источник испускает звуковые колебания с частотой  $\nu = 1,45$  кГц. На расстоянии  $r_0 = 0,5$  м от источника амплитуда смещения частиц среды  $A_0 = 50$  мкм, а в точке  $C$ , находящейся на расстоянии  $r = 10$  см от источника амплитуда смещения в  $n = 3$  раза меньше  $A_0$ . Найдите: а) коэффициент затухания волны  $\gamma$ ; б) амплитуду колебаний скорости частиц в точке  $C$ .

**1.343.** Плоская звуковая волна распространяется вдоль оси  $X$ . Коэффициент затухания волны  $0,0023$  м<sup>-1</sup>. В точке, соответствующей началу координат, уровень интенсивности равен 60 дБ. Найдите: а) уровень интенсивности в точке с координатой 5 см; б) координату точки, в которой звук уже не слышен.

**1.344.** На пути плоской звуковой волны, распространяющейся в воздухе, находится шар радиусом  $R = 50$  см. Длина звуковой волны  $\lambda = 20$  см, частота  $\nu = 1700$  Гц, амплитуда колебаний давления в воздухе  $(\Delta p)_m = 3,5$  Па. Определите средний за период поток энергии, падающей на шар.

**1.345.** неподвижный источник испускает монохроматический звук. К источнику приближается стенка со скоростью  $u = 33$  см/с. Скорость распространения звука  $v = 330$  м/с. Как изменится длина волны звука при отражении от стенки?

**1.346.** неподвижный наблюдатель воспринимает звуковые колебания от двух камертонов, один из которых приближается, а другой удаляется с такой же скоростью. При этом наблюдатель слышит биения с частотой  $\nu = 2$  Гц. Определите скорости движения камерто-

нов, если их собственная частота колебаний  $\nu_0 = 680$  Гц и скорость звука в воздухе  $v = 340$  м/с?

**1.347.** В упругой среде распространяются во взаимно перпендикулярных направлениях две плоские волны одинаковой частоты. Чему равно суммарное смещение точки в случае продольных и поперечных волн? При каких условиях наблюдается явление интерференции?

**1.348.** Две плоские поперечные волны распространяются в противоположных направлениях вдоль оси  $X$ . Найдите зависимость смещения, скорости, ускорения и относительной деформации колеблющейся точки среды в зависимости от координаты для двух моментов времени, отличающихся на  $T/4$ . На графиках  $\xi(x)$  укажите стрелками направления движения отдельных точек волны. Сравните графики  $\xi(x)$ ,  $v(x)$ ,  $a(x)$  и  $\frac{d\xi}{dx}$  для бегущей и стоячей волн. В каких точках стоячей волны возникают максимальные силы упругости.

**1.349.** Для тех же моментов времени, что и в задаче 1.348, нарисуйте графики зависимости потенциальной и кинетической энергии точки от ее координаты. Сравните их с графиками для бегущей волны. Чему равен средний за период и мгновенный поток энергии, проходящей через площадку  $dS$ , для стоячей волны?

**1.350.** Можно ли, следя за движением одной точки среды, определить, бегущая или стоячая волна существует в среде?

**1.351.** Запишите условия отражения волн на границе раздела однородных сред, уравнение стоячей волны и условие существования стоячих волн, если: а) продольная волна возбуждается в твердом стержне, закрепленном на одном конце, закрепленном посередине; б) поперечная волна возбуждается в натянутой струне, закрепленной на обоих концах; в) продольная волна возбуждается в воздушном столбе, ограниченном с одной стороны.

**1.352.** Какая волна установится в колеблющемся камертоне, если его возбудить ударом молоточка по одной из ножек? Как изменится интенсивность звука, возбуждаемого камертоном, если одну из ножек камертона, не касаясь ее, закрыть картонной трубочкой?

**1.353.** Почему колеблющийся в руке камертон звучит тихо, а поставленный на резонатор (или даже на стол) – громко? В каком случае камертон звучит дольше?

## 1.10. ГИДРОСТАТИКА И ГИДРОДИНАМИКА

**1.354.** В жидкости находится прямоугольная призма (рис. 1.80). Найдите сумму сил, действующих на грани призмы, если внешнее дав-

ление на жидкость  $p$  (весом жидкости пренебречь). Чему равна сумма сил, действующих на призму?

**1.355.** Шар радиусом  $R$  перекрывает отверстие радиусом  $r$  в плоской стенке, разделяющей жидкости, находящиеся под давлением  $3p$  и  $p$ . С какой силой прижимается шар к отверстию?

**1.356.** Докажите, что сила, с которой прижимаются половины сферического батискафа друг к другу, не зависит от наклона плоскости соприкосновения полусфер батискафа, если он полностью погружен в жидкость.

**1.357.** Каким газом следует наполнять азростаты для получения максимальной подъемной силы?

**1.358.** Как изменится потенциальная энергия мяча массой  $m$ , если его погрузить в воду на глубину  $h$ ?

**1.359.** Иногда пользуются такой формулировкой закона Архимеда: «На тело, плавающее в жидкости, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом». Можно ли считать такую формулировку общей? Может ли тело плавать в жидкости, если ее недостаточно для заполнения объема погруженной части тела? Для ответа на этот вопрос рассмотрите два случая: а) тело плавает в сосуде, объем которого много больше объема тела; б) объем сосуда сравним с объемом погруженной части плавающего тела.

**1.360.** Гидростатический парадокс. Сила давления жидкости на дно сосуда не зависит от формы сосуда, а определяется только площадью дна, высотой столба жидкости и ее плотностью. Так, эта сила будет одной и той же для всех трех сосудов, изображенных на рисунке 1.81, если они имеют дно одинаковой площади, а жидкость налита до одного и того же уровня. При взвешивании сосудов с жидкостью весы, очевидно, должны показать одно и то же значение, поскольку показания весов зависят от силы, с которой дно сосуда давит на чашку весов. Укажите, в чем ошибочность приведенного рассуждения. Что в действительности покажут весы в показанных на рисунке случаях?

**1.361.** Гидравлический пресс, заполненный водой, имеет поршни с площадью сечения  $S_1$  и  $S_2$  ( $S_1 > S_2$ ). На больший поршень становится человек массой  $m$ . На какую высоту после этого поднимется второй поршень?

**1.362.** В жидкости плотностью  $\rho_0$  плавает прямоугольный параллелепипед из материала плотностью  $\rho$ . Высота параллелепипеда  $b$ , ширина и длина  $a$ . Каким должно быть отношение  $a$  к  $b$ , чтобы положение параллелепипеда было устойчиво?

**1.363.** Плавающее тело погружено в жидкость. Центр масс тела  $C$  и центр плавучести  $A$  не лежат на одной вертикали (рис. 1.82). Может ли тело оставаться в равновесии в таком положении? Выясните, при каких условиях равновесие таких тел будет устойчивым и неустойчивым.

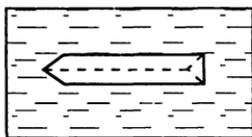


Рис. 1.80

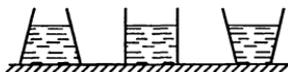


Рис. 1.81

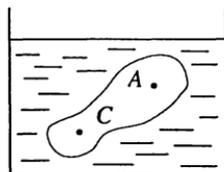


Рис. 1.82

**1.364.** Поршень, перекрывающий цилиндрическую трубку с внутренним радиусом 10 см, может перемещаться с помощью длинного вертикального штока. Трубка с поршнем, занимающим крайнее нижнее положение, опущена в цилиндрический колодец радиусом 1 м на глубину 0,5 м. На какую высоту от первоначального уровня воды в колодце можно поднять воду в трубке? Атмосферное давление равно  $10^5$  Па.

**1.365.** В полусферический колокол, плотно лежащий на столе, наливают через отверстие вверху жидкость. Когда жидкость доходит до отверстия, она приподнимает колокол и начинает вытекать снизу. Определите массу колокола, если его внутренний радиус равен  $R$ , а плотность жидкости  $\rho$ .

**1.366.** В цилиндрическом сосуде радиусом  $R$ , наполненном жидкостью плотностью  $\rho$ , в боковой стенке имеется отверстие, заткнутое пробкой. Какую работу надо совершить, чтобы вдвинуть пробку на длину  $l$ ? Пробка имеет вид цилиндра радиусом  $r$ . Центр отверстия находится на глубине  $h$ . Сосуд достаточно высок, чтобы вода из него не вылилась. Трение не учитывать.

**1.367.** Под каким углом к горизонту расположится поверхность жидкости в сосуде, скользящем по наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом, если коэффициент трения между сосудом и плоскостью равен  $\mu$ ?

**1.368.** Закрытый цилиндр радиусом  $R$ , заполненный на  $3/4$  водой, вращается в невесомости вместе с жидкостью с угловой скоростью  $\omega_1$  вокруг своей оси. Как меняется давление в жидкости в зависимости от расстояния до стенок цилиндра? Как изменяется форма поверхности жидкости, если цилиндр находится в поле тяготения Земли?

**1.369.** Полый металлический шар, внешний и внутренний диаметры которого  $d_1$  и  $d_2$ , плавает на поверхности жидкости. Плотность металла  $\rho_1$ , плотность жидкости  $\rho_2$ . Груз какой массы надо положить внутрь шара, чтобы он плавал, погрузившись в жидкость? Сжимаемостью шара пренебречь.

**1.370.** Найдите условие устойчивости для однородного цилиндра радиусом  $R$  и высотой  $l$ , плавающего в жидкости в вертикальном положении. То же для однородного параллелепипеда.

**1.371.** Найдите силу давления  $F$  воды на квадратную стенку аквариума (сторона равна  $a$ ). На какой высоте  $h$  от дна находится точка приложения равнодействующей сил давления на стенку?

**1.372.** Цилиндрический замкнутый сосуд, наполненный водой, закрыт сверху пробкой (рис. 1.83). Какое ускорение  $\vec{a}$  в горизонтальном направлении вдоль оси цилиндра надо сообщить сосуду для того, чтобы пробка вылетела, если она может выдержать давление 500 Па? Расстояние отверстия от одного основания цилиндра 1 м, от другого 0,1 м.

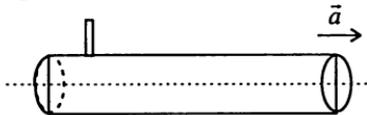


Рис. 1.83

**1.373.** По горизонтальной трубе переменного сечения течет идеальная жидкость. В трубу впаяны вертикальные трубки (рис. 1.84). На какую высоту поднимается жидкость в каждой из трубок, если скорость воды в широкой части трубы  $\vec{v}_1$ , давление  $p_1$ , а площадь поперечного сечения в широкой и узкой частях трубы равна  $S_1$  и  $S_2$  соответственно?

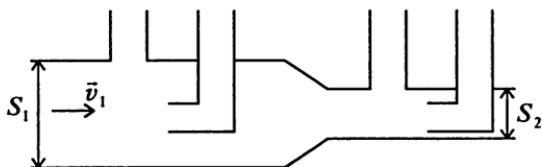


Рис. 1.84

**1.374.** Как приближенно оценить скорость катера, если вода поднимается вдоль вертикальной носовой части катера на высоту  $h$ ?

**1.375.** По наклонной плоскости стекает широкий поток воды. На расстоянии  $l$  по течению глубина потока уменьшилась вдвое. На каком расстоянии глубина потока уменьшится в 4 раза?

**1.376.** В бак равномерной струей наливается вода. Подача (объемная) воды равна  $a$ . В дне бака имеется отверстие площадью  $S \ll S_6$ . На каком уровне будет держаться вода в баке?

**1.377.** Насосная станция города поддерживает в водопроводе на уровне первого этажа давление  $5 \cdot 10^5$  Па. Определите, с какой скоростью вытекает вода из крана на первом, втором и третьем этаже, если кран последующего этажа расположен на 4 м выше предыдущего. На какой этаж вода уже не поднимется?

**1.378.** На гладкой горизонтальной поверхности стоит сосуд с водой. В боковой стенке около дна имеется отверстие площадью  $S$ , из которого в некоторый момент начинает вытекать вода. Какую силу

надо приложить к сосуду, чтобы удержать его в равновесии, если начальная высота уровня воды в сосуде  $h_0$ ?

1.379. 1. Определите скорость  $v$  стационарного истечения через малое отверстие струи идеальной несжимаемой жидкости, находящейся под давлением  $p$  в закрытом сосуде (рис. 1.85, а). 2. Для того, чтобы струя жидкости вытекала из сосуда с постоянной скоростью, применяют устройство, изображенное на рисунке 1.85, б. Определите скорость истечения воды в этом случае.

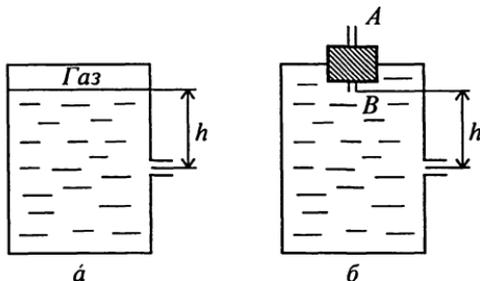


Рис. 1.85

1.380. Очень широкий цилиндрический сосуд  $A$  имеет в дне отверстие, снабженное вертикальной трубкой  $B$ , к которой присоединен манометр  $M$ . Нижний конец трубки закрыт пробкой (рис. 1.86). Уровни жидкости в сосуде и манометре одинаковы. Как расположится уровень жидкости в манометре, если жидкость будет вытекать из сосуда  $B$  (внутренним трением пренебречь)? Как изменится ответ, если трубка  $B$  сужается внизу?

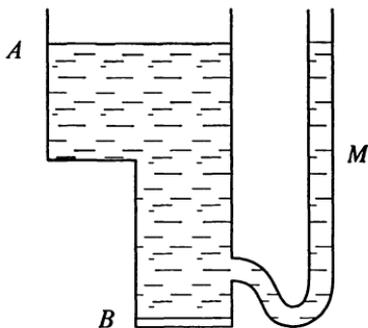


Рис. 1.86

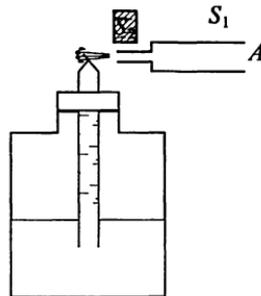


Рис. 1.87

1.381. Принцип действия пульверизатора иллюстрируется рисунком 1.87. Определите максимальную высоту  $h$ , на которую он может

засасывать жидкость из резервуара, если известно, что давление воздуха перед входом в трубу  $A$  равно  $p_0$ , площади широкого и узкого сечения этой трубы равны  $S_1$  и  $S_2$ , скорость потока в сечении  $S_1$  равна  $\bar{v}_1$ , вязкостью жидкости и воздуха можно пренебречь. Плотность жидкости  $\rho$ .

**1.382.** Для переливания воды из одного сосуда в другой часто используется П-образная трубка, называемая сифоном (рис. 1.88). При каких условиях можно перелить с помощью сифона жидкость? Какова скорость вытекания жидкости в этих условиях? Как распределено статическое давление в разных сечениях сифона?

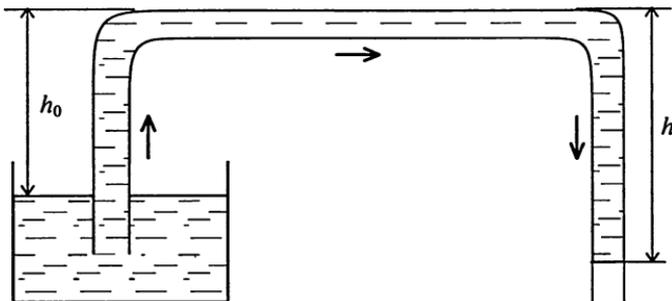


Рис. 1.88

**1.383.** По горизонтальной трубе постоянного сечения течет стационарный поток жидкости. Опишите распределение давления и скоростей частиц жидкости в одном из сечений трубы и вдоль оси трубы для двух случаев: а) жидкость идеальная; б) жидкость реальная.

**1.384.** Определите максимальную скорость течения воды при температуре  $15^\circ\text{C}$  по трубе с внутренним диаметром 2 см, при которой течение еще останется ламинарным. Какова при такой скорости разность давлений между двумя точками внутри трубы, расстояние между которыми равно 200 м?

**1.385.** В высокий сосуд, наполненный касторовым маслом, при  $20^\circ\text{C}$  бросают маленькие свинцовые шарики разных диаметров. Опустившись на некоторую глубину, шарики дальше движутся равномерно. Почему? Определите число Рейнольдса для движения шарика диаметром 0,1 мм, предполагая, что движение масла при опускании шарика является ламинарным. Правильно ли это предположение? Каков максимальный диаметр шарика, соответствующий ламинарному течению жидкости при его опускании?

**1.386.** По трубе длиной  $l$  и радиусом  $R$  течет стационарный поток жидкости, плотность которой  $\rho$ , вязкость  $\eta$ . Скорость течения жидкости по оси трубы составляет  $v_0$ . Определите: а) объем жидкости, проте-

кающей через сечение трубы в единицу времени, б) кинетическую энергию жидкости, заключенной в трубе; в) силу трения, которую испытывает труба со стороны жидкости; г) разность давлений на концах трубы.

## 1.11. ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

**1.387.** До Галилея полагали, что чем массивнее тело, тем быстрее оно падает. Попробуйте, пользуясь аддитивностью массы, логически доказать, что все тела независимо от их массы в безвоздушном пространстве должны падать одинаково. (Тем самым будут повторены рассуждения Галилея.)

**1.388.** Чему равна гравитационная сила, действующая на материальную точку массой  $m$ , помещенную внутри однородной полой сферы массой  $M$ ? Как изменился бы результат, если бы в законе всемирного тяготения сила была бы пропорциональна не  $r^{-2}$ , а  $r^{-2.5}$ ?

**1.389.** Нарисуйте линии напряженности гравитационного поля для: а) материальной точки; б) двух материальных точек. Отражает ли картина линий напряженности для случая б) взаимодействие между двумя этими материальными точками?

**1.390.** Тело свободно падает с ускорением  $\bar{a}$  в гравитационном поле вблизи поверхности некоторой планеты. Чему равна напряженность гравитационного поля этой планеты вблизи ее поверхности?

**1.391.** Найдите поток вектора напряженности гравитационного поля (рис. 1.89, а, б, в).

**1.392.** Найдите, используя теорему Остроградского – Гаусса, напряженность гравитационного поля, создаваемого: а) полой однородной сферой; б) однородным шаром. Чему равна напряженность поля

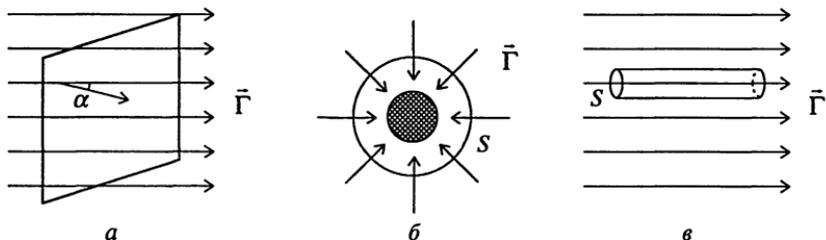


Рис. 1.89

на различных расстояниях от центра этих тел? Нарисуйте график зависимости  $\Gamma(r)$ .

**1.393.** Чему равна потенциальная энергия материальной точки массой  $m$  в поле, создаваемом однородным шаром массой  $M$ ? Как из-

меняются кинетическая и полная энергия материальной точки, свободно падающей в таком поле?

**1.394.** Определите потенциал  $\varphi$  гравитационных полей, создаваемых поллой сферой и однородным сплошным шаром, в точках, расположенных на различных расстояниях от их центров. Нарисуйте графики зависимости  $\varphi(r)$ .

**1.395.** Существуют ли тела конечных размеров, взаимодействующие как материальные точки?

**1.396.** Две планеты имеют одинаковую плотность, но различную массу. Одинаково ли ускорение свободного падения одного и того же тела вблизи поверхности этих планет? Одинаков ли ход маятниковых часов на их поверхности?

**1.397.** В однородном сплошном шаре вырезана небольшая сферическая полость, центр которой не совпадает с центром шара. Каков характер гравитационного поля внутри полости?

**1.398.** Гравитационное поле создается двумя материальными точками. Как меняется напряженность поля вдоль перпендикуляра, проходящего через середину отрезка, соединяющего эти точки? В каких точках на этой линии наблюдаются максимумы напряженности поля?

**1.399.** При каких начальных условиях космический корабль в гравитационном поле движется по прямолинейной траектории? по криволинейной траектории? Покажите, что при любых свободных движениях тела в гравитационном поле траектория его движения – плоская.

**1.400.** На рисунке 1.90 приведен график функции  $E_{p\text{эф}}(r)$ , отражающей взаимодействие двух тел массами  $m$  и  $M$ , где  $E_{p\text{эф}} = \frac{L^2}{2mr^2} - G \frac{mM}{r}$

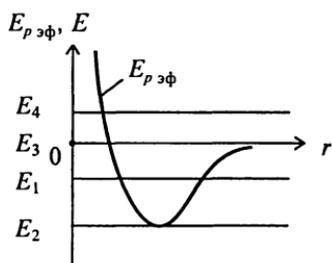


Рис. 1.90

( $L$  – момент импульса тела массой  $m$ ). В какой области пространства движется тело, если его полная энергия  $E$  равна  $E_1$ ;  $E_2$ ;  $E_3$ ;  $E_4$ ? Возможны ли значения  $E < E_2$ ? Укажите на графике значения  $r$  (для каждого значения энергии  $E$ ), при которых вектор  $\vec{v}$  перпендикулярен направлению движения. Чему соответствует разница в значении  $E_1 - E_{p\text{эф}}$ ? Как изменится зависимость  $E_{p\text{эф}}(r)$ , если при минимальном

значении  $r$  тело уменьшит или увеличит модуль скорости без изменения ее направления?

**1.401.** Космический корабль свободно падает на Землю (из бесконечности). На некотором расстоянии от поверхности Земли включается двигатель, который поворачивает корабль на  $90^\circ$  без изменения

модуля скорости. По какой траектории будет происходить дальнейшее движение корабля?

**1.402.** С расстояния  $R_0$  на некоторую планету падает без начальной скорости космический корабль. На каком расстоянии от планеты необходимо включить двигатель и изменить направление скорости на  $90^\circ$  (без изменения ее модуля), чтобы корабль стал спутником планеты? Атмосфера у планеты отсутствует.

**1.403.** Какую скорость необходимо сообщить космическому кораблю у поверхности Земли, чтобы он смог стать ее спутником и двигаться по круговой орбите радиусом  $R = R_3$  ( $R_3 = 6370$  км)?

**1.404.** Как связаны потенциальная, полная и кинетическая энергии при движении тела по круговой траектории в гравитационном поле?

**1.405.** Можно ли запустить спутник, который все время находился бы над одной и той же точкой поверхности Земли? Если можно, то в какой плоскости должна лежать его орбита? Рассчитайте параметры орбиты такого спутника.

**1.406.** Две планеты обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Определите отношение их линейных скоростей и периодов обращения.

**1.407.** Планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. В какой точке траектории скорость планеты наибольшая, в какой наименьшая? Пусть скорость планеты в перигее, находящемся на расстоянии  $r_n$  от Солнца, равна  $v_n$ . Чему равна скорость планеты в апогее  $v_a$ ? Определите радиусы кривизны траектории в этих точках.

**1.408.** Две планеты имеют одинаковые плотности, но разные массы. Как различаются космические скорости тел для этих планет?

**1.409.** Корабль, запускаемый с Земли, должен покинуть Солнечную систему. Зависит ли модуль начальной скорости, которую для этого нужно сообщить кораблю, от направления этой скорости?

**1.410.** Чему равна сила, действующая на материальную точку массой  $m$  в узком канале, проходящем через центр однородного шара? Каков характер движения точки в канале? Найдите уравнение движения точки вдоль канала.

**1.411.** Что изменится, если канал проходит по одной из хорд шара (см. задачу 1.410)? Рассмотрите технические возможности такого способа перемещения тел на Земле.

**1.412.** Сравните напряженности гравитационных полей, создаваемых на поверхности Земли Землей; Солнцем; Луной. Какое поле является более однородным?

**1.413.** Тело взвешивают на пружинных весах на экваторе в полдень, когда гравитационные силы, действующие со стороны Земли и Солнца, направлены в противоположные стороны. Одновременно

такое же тело взвешивают в противоположной точке земного шара. Вес какого тела будет больше? Зависит ли ответ от степени однородности поля, создаваемого Солнцем вблизи Земли?

**1.414.** Объясните происхождение приливных эффектов, наблюдаемых на Земле. Почему они происходят два раза в сутки? Почему они связаны в основном с гравитационным взаимодействием Луны и Земли, а не Земли и Солнца?

**1.415.** Правильны ли такие утверждения (иными словами, можно ли сформулировать принцип эквивалентности следующим образом): а) всякое гравитационное поле может быть имитировано силами инерции; б) любые силы инерции во всех точках пространства можно заменить гравитационными силами?

**1.416.** Шарик массой  $m_1$  находится на расстоянии  $a$  от конца тонкого однородного стержня массой  $m_2$  и длиной  $l$  (рис. 1.91). Определите силу гравитационного взаимодействия шарика и стержня.

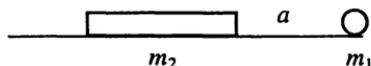


Рис. 1.91

**1.417.** Два твердых шара, плотности которых равны  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , находятся в жидкости плотностью  $\rho_0$  вдали от границ жидкости. При каком условии шары при взаимодействии притягиваются друг к другу и при каком отталкиваются?

**1.418.** Планета массой  $m$  движется по эллипсу вокруг Солнца так, что наибольшее и наименьшее ее расстояния от Солнца соответственно равны  $r_1$  и  $r_2$ . Определите момент импульса  $L$  этой планеты относительно центра Солнца.

**1.419.** Согласно третьему закону Кеплера, отношение куба большой полуоси эллиптической орбиты  $a$  к квадрату периода обращения планеты  $T$ , есть величина постоянная для всех планет солнечной системы. Найдите выражение для постоянной Кеплера. При каком предположении справедлив закон Кеплера?

**1.420.** Некоторая планета массой  $M$  движется вокруг Солнца по эллипсу так, что минимальное расстояние между ней и Солнцем равно  $r_1$ , максимальное —  $r_2$ . Определите с помощью законов Кеплера период обращения планеты вокруг Солнца.

**1.421.** Докажите с помощью законов сохранения, что полная механическая энергия планеты массой  $m$ , движущейся вокруг Солнца по эллипсу, зависит только от большой полуоси  $a$  эллипса. Выразите эту зависимость математически.

**1.422.** Космическое тело движется к Солнцу, имея вдали от него скорость  $v_0$  и прицельный параметр  $l$  — плечо вектора  $\vec{v}_0$  относительно Солнца (рис. 1.92). На какое наименьшее расстояние это тело приблизится к Солнцу?

1.423. Метеорит, имеющий на большом расстоянии от Земли относительную скорость  $v_0$ , попадает на Землю, если его прицельный параметр (см. задачу 1.422) меньше некоторого критического значения  $l_k$ . Определите эффективное сечение захвата метеорита Землей  $\sigma = \pi l_k^2$ .

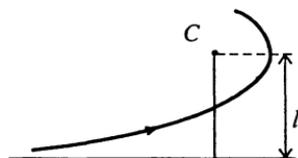


Рис. 1.92

1.424. Механическая энергия искусственного спутника Земли уменьшилась вследствие трения на 2%. Принимая, что орбита спутника до потери и после потери энергии мало отличается от круговой, вычислите, как изменится после потери энергии радиус орбиты, скорость спутника и период обращения.

1.425. Спутник поднят ракетой-носителем вертикально до высоты  $R = 1,25 R_3$  ( $R_3$  – радиус Земли, отсчитываемый от ее центра). В верхней точке ракетное устройство сообщило спутнику горизонтальную скорость  $\bar{v}$ , равную по модулю первой космической скорости, и вывело его на эллиптическую орбиту. Каково минимальное и максимальное удаление спутника от центра Земли?

1.426. В результате взрыва астероид, двигавшийся по круговой орбите вокруг Солнца, распался на два осколка одинаковой массы. Один осколок непосредственно после взрыва остановился, а другой продолжал движение. По какой траектории (эллиптической, гиперболической, параболической) будет двигаться второй осколок?

1.427. В условиях предыдущей задачи оба осколка разбегаются в перпендикулярных направлениях с одинаковыми по модулю скоростями. По каким орбитам они будут двигаться? На какое наименьшее расстояние к Солнцу подойдут осколки после взрыва, если радиус орбиты астероида был равен  $R$ ?

1.428. В прошлом столетии Г. Гельмгольц и В. Томсон выдвинули гипотезу, согласно которой излучение Солнца поддерживается за счет гравитационной энергии, освобождающейся при его сжатии. Оцените возраст Солнца по такой гипотезе, предполагая, что в начальном состоянии вещество Солнца было равномерно распределено по всему бесконечному пространству, а в конечном состоянии плотность солнечного вещества одинакова по всему объему Солнца. Масса Солнца  $M_c = 2 \cdot 10^{30}$  кг, радиус  $R_c = 7 \cdot 10^5$  м. При решении можно считать, что мощность излучения Солнца за время его существования оставалась постоянной и равнялась современному значению  $P = 3,86 \cdot 10^{26}$  Вт. Обсудите правдоподобность гипотезы Гельмгольца – Томсона, приняв во внимание, что по геологическим данным возраст Земли составляет около  $4,5 \cdot 10^9$  лет.

1.429. Найдите закон распределения давления внутри земного шара, считая его состоящим из однородной несжимаемой жидкости и

пренебрегая осевым вращением Земли. Вычислите в том же приближении давление в центре Земли.

1.430. Наибольшее расстояние кометы Галлея от Солнца  $r_1 = 35,4R_{\text{Зс}}$ , наименьшее  $r_2 = 0,59R_{\text{Зс}}$  ( $R_{\text{Зс}}$  – расстояние от Земли до Солнца). Линейная скорость движения кометы в точке ее наибольшего удаления от Солнца (в апогее)  $v_1 = 0,91$  км/с. Как велика ее линейная скорость в перигее (точке наименьшего удаления)?

## Раздел 2 ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

### 2.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

#### Напряженность поля точечного заряда и системы точечных зарядов. Взаимодействие зарядов

2.1. Можно ли сообщить телу заряд  $10^{-20}$  Кл;  $10^{-10}$  Кл? Модуль элементарного заряда  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Существует ли эквивалентный ему квант массы?

2.2. Можно ли считать заряд ядра в атоме точечным?

2.3. Является ли электрическое поле просто удобным способом описания электрических явлений или оно реально существует?

2.4. Поле создается закрепленным точечным зарядом  $q$ . Можно ли для определения напряженности поля в качестве пробного заряда взять заряд  $100q$ ? Изменится ли ответ на предыдущий вопрос, если заряд  $q$ , создающий поле, может перераспределяться (например, он находится на металлическом шаре)?

2.5. Нарисуйте картину линий напряженности электростатического поля, созданного двумя точечными одноименными зарядами, и линий напряженности гравитационного поля, созданного двумя материальными точками. В чем физический смысл различий?

2.6. Совпадает ли в общем случае линия напряженности с траекторией движения заряда в поле?

2.7. Могут ли линии напряженности электростатического поля пересекаться; соприкасаться; быть замкнутыми?

2.8. Сравните силы гравитационного и кулоновского взаимодействия двух электронов. Во сколько раз масса частицы должна быть больше массы электрона, чтобы при том же заряде сила кулоновского отталкивания двух одинаковых частиц уравновесилась силой гравитационного притяжения?

2.9. Вычислите ускорение, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся от первого на расстоянии 1 мм.

**2.10.** За несколько лет до того, как Кулон открыл закон взаимодействия электрических зарядов, американский ученый Франклин заметил, что на заряд, помещенный внутрь равномерно заряженной сферы, не действуют никакие силы. Можно ли, используя этот факт, сделать предположение о зависимости электрических сил от расстояния?

**2.11.** На двух одинаковых каплях воды находится по одному лишнему электрону, причем сила электростатического отталкивания капелек уравнивает силу их гравитационного притяжения. Каковы радиусы капелек?

**2.12.** С какой силой  $F$  притягивались бы две одинаковые свинцовые дробинки радиусом  $r = 1$  мм, расположенные на расстоянии  $R = 1$  м друг от друга, если бы у каждого атома первой дробинки отняли по одному электрону и перенесли их на вторую дробинку? Молярная масса свинца  $M = 0,207$  кг/моль, плотность  $\rho = 11,3$  г/см<sup>3</sup>.

**2.13.** Чтобы понять, влияют ли внешние электрические поля на движение внутренних электронов в атоме, рассчитайте напряженность электрического поля и кулоновскую силу, действующую на электрон в атоме водорода. Сопоставьте полученное значение с напряженностью поля пробоя сухого воздуха при нормальных условиях  $E_{пр} = 3 \cdot 10^6$  В/м.

**2.14.** Два маленьких проводящих шарика подвешены на длинных непроводящих нитях к одному крючку. Шарик заряжены одинаковыми зарядами и находятся на расстоянии 5 см друг от друга. Что произойдет, если один из шариков разрядить?

**2.15.** Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины в одной точке, опускаются в керосин. Какова должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине был один и тот же?

**2.16.** Альфа-частица проходит через геометрический центр молекулы водорода, двигаясь перпендикулярно к линии, соединяющей оба протона. Расстояние между протонами равно  $l$ . В какой точке на  $\alpha$ -частицу действует максимальная сила? Считайте, что протоны мало смещаются при движении  $\alpha$ -частицы (это близко к истине) и что электрическим полем электронов можно пренебречь (это упрощение грубое). Приняв направление движения  $\alpha$ -частицы за ось  $X$  с началом координат посередине расстояния между протонами, постройте зависимость силы, действующей на  $\alpha$ -частицу, от координаты  $x$ .

**2.17.** Положительные точечные заряды  $q$  и  $2q$  расположены на расстоянии  $l$  друг от друга. Каким должен быть заряд  $Q$  (по модулю и знаку) и в какой точке его надо расположить, чтобы все три заряда находились в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?

**2.18.** Четыре положительных заряда по  $10^{-7}$  Кл каждый помещены в вершинах квадрата. Какой отрицательный заряд надо поместить в центр квадрата, чтобы вся система находилась в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?

2.19. Три одинаковых одноименных заряда  $q$  расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд  $Q$  противоположного знака нужно поместить в центре этого треугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

2.20. Молекулу воды можно рассматривать как диполь длиной  $l = 3,9 \cdot 10^{-11}$  м с зарядами, модуль которых равен модулю заряда электрона. Определите напряженность поля, созданного одной молекулой воды на расстоянии  $d = 3 \cdot 10^{-9}$  м от середины диполя в точке  $A$ , лежащей на продолжении диполя, и в точке  $B$ , лежащей на перпендикуляре, восстановленном из середины диполя.

2.21. В однородном электрическом поле, напряженность которого  $E = 3 \cdot 10^4$  В/м, находится диполь длиной  $l = 3,9 \cdot 10^{-11}$  м с зарядами, модуль которых равен модулю заряда электрона. Ось диполя составляет с направлением линий напряженности угол  $\alpha = 30^\circ$ . Найдите вращающий момент, действующий на диполь.

2.22. На расстоянии  $r = 10$  см от точечного заряда  $q_0 = 10^{-3}$  Кл находится диполь, ось которого составляет  $90^\circ$  с направлением линий напряженности поля, созданного зарядом  $q_0$ . Модуль каждого из зарядов диполя  $q = 10^{-8}$  Кл, длина диполя  $l = 1$  см. Определите вращающий момент, действующий на диполь. Как установится диполь в поле заряда  $q_0$ ? Какая сила будет на него действовать в этом случае?

2.23. На рисунке 2.1 показаны два одинаковых диполя, расположенных взаимно перпендикулярно на расстоянии  $r \gg l$  ( $r$  – расстояние между центрами диполей). Каковы вращающие моменты, действующие на диполь  $A$  и на диполь  $B$ ?

2.24. Известно, что точечный заряд может двигаться по окружности в поле диполя. Как расположена его траектория по отношению к диполью, если заряд положительный, отрицательный? В каких пределах может изменяться скорость такого движения?

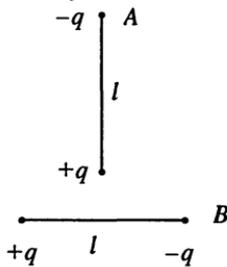


Рис. 2.1

## Напряженность поля макроскопических заряженных тел

2.25. Можно ли зарядить равномерно по объему или по поверхности макроскопическое тело, сообщив ему заряд  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл?

2.26. Как зависел бы поток вектора напряженности от радиуса сферы, окружающей равномерно заряженный шар, если бы кулоновская сила была пропорциональна не  $r^{-2}$ , а  $r^{-3}$  или  $r^{-1}$ ?

2.27. Поток вектора напряженности электростатического поля через некоторую замкнутую поверхность, проходящую через точку  $A$ , равен нулю. Можно ли утверждать, что на заряд, помещенный в эту точку, электрические силы не действуют?

**2.28.** Будет ли изменяться поток вектора  $\vec{E}$  через замкнутую поверхность, окружающую некоторые заряженные тела, если эти тела перемещаются, оставаясь внутри поверхности?

**2.29.** Приведите примеры макроскопических заряженных тел, для которых напряженность созданных ими полей может быть найдена с помощью электростатической теоремы Остроградского – Гаусса?

**2.30.** Почему теорема Остроградского – Гаусса не может быть использована для нахождения напряженности поля, например, заряженного куба?

**2.31.** Напряженность электрического поля Земли около поверхности в среднем равна 130 В/м. Какой заряд имела бы Земля, если бы напряженность поля около всей ее поверхности была бы равна этому значению?

**2.32.** Заряд  $q$  равномерно распределен по поверхности сферы радиусом  $R$ . Определите, как зависит напряженность поля  $E$  от расстояния  $r$  до центра сферы, и постройте график  $E(r)$ . Решите эту же задачу для двух концентрических сфер радиусами  $R$  и  $2R$  и зарядами  $q$  и  $-2q$  соответственно.

**2.33.** Шар радиусом  $R$  заряжен однородно с объемной плотностью  $\rho$ . Найдите напряженность поля  $E$  для точек внутри и вне шара как функцию расстояния  $r$  от центра шара. Диэлектрическую проницаемость вещества шара принять равной единице.

**2.34.** Бесконечная плоскость равномерно заряжена с поверхностной плотностью  $\sigma$ . Определите напряженность поля в любой точке пространства. Решите эту задачу для двух параллельных плоскостей, заряженных разноименно с одинаковой и различной поверхностной плотностью. Постройте графики зависимости напряженности поля от расстояния до одной из плоскостей.

**2.35.** Определите напряженность поля  $E$  внутри и вне безграничного плоского слоя диэлектрика толщиной  $d$ , в котором равномерно распределен положительный заряд с объемной плотностью  $\rho$ .

**2.36.** На вертикальной пластине достаточно больших размеров равномерно распределен электрический заряд с поверхностной плотностью  $\sigma = 3 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>. На прикрепленной к пластине нити подвешен маленький шарик массой  $m = 1$  г, несущий заряд того же знака, что и пластина. Каков его заряд  $q$ , если нить образует с вертикалью угол  $\alpha = 30^\circ$ ?

**2.37.** Бесконечно длинный тонкостенный цилиндр радиусом  $R$  равномерно заряжен с линейной плотностью  $\gamma$ . Определите напряженность поля как функцию расстояния  $r$  от оси цилиндра.

**2.38.** Чему равна напряженность поля в центре равномерно заряженного проволочного кольца, имеющего форму окружности радиусом  $R$ , если полный заряд кольца  $q$ ? Как изменится результат, если из кольца вырезать кусок длиной  $d \ll R$ ?

**2.39.** Вычислите напряженность поля на оси равномерно заряженного кольца радиусом  $R$  в зависимости от расстояния  $h$  до его центра. В какой точке на оси кольца напряженность поля имеет максимальное значение?

**2.40.** Точечный заряд  $q$  находится в центре тонкого кольца радиусом  $R$ , по которому равномерно распределен отрицательный заряд, равный по модулю  $q$ . Найдите модуль вектора напряженности электрического поля на оси кольца в точке, отстоящей от центра кольца на расстоянии  $h$ , если  $h \geq R$ .

**2.41.** Кольцо из тонкой проволоки разрывается, если на нем находится заряд  $q_0$ . Диаметр кольца и диаметр проволоки увеличили в три раза. При каком значении заряда кольцо разорвется?

**2.42.** Диск радиусом  $R$  заряжен равномерно с поверхностной плотностью  $\sigma$ . Определите напряженность поля  $E$  в точке, находящейся на перпендикуляре к диску, проходящем через его центр, на расстоянии  $h$  от диска. Что дает полученная формула в случаях: а)  $R \gg h$ ; б)  $R \ll h$ ?

**2.43.** Полусфера радиусом  $R$  равномерно заряжена, поверхностная плотность заряда равна  $\sigma$ . Чему равна напряженность поля в центре полусферы?

**2.44.** Внутри шара радиусом  $R$ , заряженного равномерно с объемной плотностью  $\rho$ , имеется сферическая полость радиусом  $r$ . Центр полости смещен относительно центра шара на расстояние  $a$ . Определите напряженность поля  $\vec{E}_0$  внутри полости, полагая диэлектрическую проницаемость равной единице.

**2.45.** Плоскость равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ . В середине плоскости имеется круглое отверстие, радиус которого  $r$  мал по сравнению с линейными размерами плоскости. Найдите напряженность электрического поля  $E$  в точке, лежащей на перпендикуляре к плоскости, проходящем через центр отверстия; расстояние от центра отверстия до исследуемой точки  $h$ . (Предварительно решите задачу 2.42.)

**2.46.** Рассчитайте напряженность поля заряженной нити (длина  $l$ , линейная плотность заряда  $\gamma$ ) в точке на перпендикуляре, восстановленном из середины нити. Получите выражение для напряженности поля в предельных случаях очень большого и очень малого расстояния  $h$  нити до точки наблюдения.

**2.47.** Для равномерно заряженной нити длиной  $l$  с линейной плотностью заряда  $\gamma$  найдите модуль  $E$  напряженности поля в точках, лежащих на оси нити вне ее, как функцию расстояния  $r$  от центра нити. Исследуйте случай  $r \gg l$ .

**2.48.** Расстояние между двумя параллельными длинными проволоками  $a = 14$  см. Проволоки заряжены разноименными зарядами с линейной плотностью  $\gamma = \pm 10^{-8}$  Кл/м. Определите напряженность поля в

точке, удаленной на расстояние  $r = 10$  см как от первой, так и от второй проволоки.

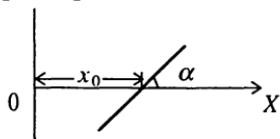


Рис. 2.2

2.49. В одной плоскости с очень длинной нитью, равномерно заряженной с линейной плотностью  $\gamma$ , под углом  $\alpha$  к нити расположен тонкий стержень длиной  $l$ , по которому равномерно распределен заряд  $q$  (рис. 2.2). Расстояние от нити до середины стержня  $x_0$ . Най-

дите силу, действующую на стержень, и ее предельные значения при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ .

2.50. Напряженность поля внутри плоского воздушного конденсатора равна  $E$ , а заряд пластин равен  $\pm q$ . Какая сила действует на каждую пластину?

2.51. Какая сила действует на элемент поверхности бесконечной заряженной плоскости? Чему равна эта сила для сферы и для проводника произвольной формы, если площадь элемента  $dS$ , а поверхностная плотность заряда  $\sigma$ ?

### Потенциал поля точечного заряда и системы точечных зарядов

2.52. В начале координат закреплен положительный заряд  $q_1$ , а единичный положительный заряд  $q_2$  перемещается из бесконечности в точку, отстоящую на расстоянии  $r$  от заряда  $q_1$ . Какая работа совершается при этом полем? Какова эта работа, если заряд  $q_2$  отрицательный?

2.53. Зависит ли значение работы (см. задачу 2.52) от формы и длины пути при неподвижном заряде  $q_1$ ?

2.54. Изобразите зависимости  $\varphi(r)$  для точечных положительного и отрицательного зарядов. Каков физический смысл знака потенциала?

2.55. Как будет двигаться в электростатическом поле положительный (отрицательный) заряд: от точки с более низким потенциалом к точке с более высоким потенциалом или в противоположном направлении?

2.56. Изобразите семейства линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей следующих систем: а) двух одноименных зарядов; б) двух разноименных зарядов. Сравните с аналогичным рисунком для двух материальных точек.

2.57. Было бы потенциальным поле точечного заряда, если бы его напряженность изменялась обратно пропорционально первой степени расстояния? третьей степени расстояния?

2.58. Какова работа по перемещению пробного заряда из бесконечности в данную точку ( $A$ ,  $B$ ) поля, созданного двумя равными по

модулю разноименными точечными зарядами (рис. 2.3)? Точки  $A$  и  $B$  расположены на перпендикуляре к прямой, соединяющей заряды, на одинаковом расстоянии от них.

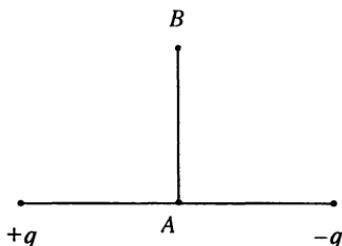


Рис. 2.3

**2.59.** Положительные заряды  $q_1 = 3 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $q_2 = 6 \cdot 10^{-5}$  Кл находятся в вакууме на расстоянии 3 м друг от друга. Какая работа совершается полем при сближении зарядов до расстояния 0,5 м?

**2.60.** В вершинах правильного шестиугольника со стороной 5 см расположены точечные заряды, каждый из которых равен  $6,6 \cdot 10^{-9}$  Кл. Определите работу электрических сил при перенесении заряда  $3,3 \cdot 10^{-9}$  Кл из центра шестиугольника в середину одной из его сторон. Чему равна эта работа, если заряды равны между собой по модулю, но соседние заряды противоположны по знаку?

**2.61.** Два заряда  $q_1 = 4 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $q_2 = -6 \cdot 10^{-7}$  Кл находятся на расстоянии  $l = 10$  см друг от друга. Определите: а) напряженность поля в той точке, где потенциал поля равен нулю; б) потенциал той точки поля, где напряженность равна нулю. (Точки считать расположенными на прямой, проходящей через заряды.)

**2.62.** Рассчитайте потенциал поля двух одноименных точечных зарядов  $q$ , расположенных на расстоянии  $l$  друг от друга, в зависимости от расстояния  $x$  вдоль линии, соединяющей заряды. Постройте график этой зависимости. Решите задачу для случая, когда заряды разноименные.

**2.63.** Диполь с электрическим моментом, значение которого равно  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл·м, свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью, равной 1500 В/см. Какую нужно совершить работу, чтобы повернуть диполь на  $180^\circ$ ?

**2.64.** Определите напряженность и потенциал поля диполя с электрическим моментом  $\vec{p}$  вдали от него в зависимости от расстояния  $r$  от центра диполя до точки наблюдения и угла  $\theta$  между радиусом-вектором  $\vec{r}$  этой точки и осью диполя.

**2.65.** На прямой, соединяющей два заряда  $q$  и  $-3q$ , находящихся на расстоянии  $d = 1$  м друг от друга, найдите точки, для которых напряженность  $E = 0$  и потенциал  $\varphi = 0$ .

### Потенциал поля макроскопических заряженных тел

**2.66.** Если напряженность  $E$  в данной точке равна нулю, то должен ли в ней равняться нулю и потенциал?

2.67. Если известна напряженность в данной точке, то можно ли найти потенциал в данной точке? Если нет, то какая дополнительная информация для этого потребуется?

2.68. Могут ли эквипотенциальные поверхности электростатического поля пересекаться или соприкасаться?

2.69. Могут ли линии напряженности выглядеть так, как показано на рисунке 2.4?

2.70. Изобразите линии напряженности поля, эквипотенциальные поверхности которого показаны на рисунке 2.5.

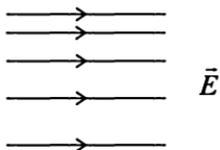


Рис. 2.4

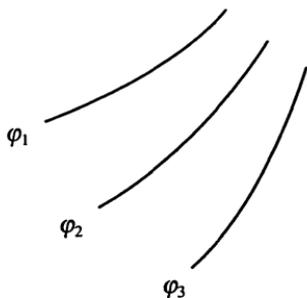


Рис. 2.5

2.71. Обычно потенциал Земли принимают за нуль. Можно ли произвольно приписать Земле потенциал  $+100$  В вместо нуля?

2.72. Сколько электронов содержит заряженная пылинка массой  $10^{-11}$  г, если она находится в равновесии в плоском конденсаторе с расстоянием между пластинами  $5$  мм, заряженном до разности потенциалов  $76,5$  В?

2.73. Поверхностная плотность заряда пластины бесконечно больших размеров равна  $10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>. На каком расстоянии друг от друга находятся эквипотенциальные поверхности, если их потенциалы отличаются на  $5$  В?

2.74. Найдите, как зависит потенциал от координаты в выбранной системе отсчета, и постройте график этой зависимости для:

- сферы радиусом  $R$ , по которой равномерно распределен заряд  $q$ ;
- двух концентрических сфер радиусами  $R$  и  $2R$ , по которым равномерно распределены заряды  $+q$  и  $-q$ ;
- бесконечной плоскости с поверхностной плотностью зарядов  $\sigma$ ;
- двух бесконечных плоскостей с плотностями зарядов  $\sigma$  и  $-\sigma$ ;
- бесконечно длинного цилиндра радиусом  $R$  и с линейной плотностью заряда  $\gamma$ ;
- двух коаксиальных бесконечно длинных цилиндров радиусами  $R$  и  $2R$  и линейной плотностью зарядов  $\gamma$  и  $-\gamma$ , соответственно.

**2.75.** Можно ли проводящий шар радиусом 10 м зарядить до потенциала  $2 \cdot 10^6$  В, если пробой воздуха при нормальном атмосферном давлении происходит при напряженности электрического поля  $3 \cdot 10^6$  В/м?

**2.76.** Какой заряд надо поместить на изолированный металлический шар радиусом 1 м, чтобы потенциал поля стал равен  $10^6$  В? Проведите аналогичный расчет для шара радиусом 0,1 см. Почему в электростатических генераторах Ван-дер-Граафа применяют шары больших размеров, хотя тот же потенциал может быть сообщен меньшему шару при помощи меньшего заряда?

**2.77.** Около заряженной бесконечно протяженной плоскости находится точечный заряд  $q = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Под действием поля заряд перемещается по линии напряженности на расстояние 2 см, при этом совершается работа  $A = 5 \cdot 10^{-9}$  Дж. Определите поверхностную плотность заряда на плоскости.

**2.78.** Разность потенциалов между длинными коаксиальными цилиндрами ( $R_1 = 3$  см и  $R_2 = 10$  см), заряженными равными по модулю разноименными зарядами, равна  $\Delta\phi = 450$  В. Определите: а) линейную плотность заряда  $\gamma$  на цилиндрах; б) поверхностную плотность заряда на каждом цилиндре; в) напряженность вблизи внутренней поверхности внешнего цилиндра, на середине расстояния между цилиндрами и вблизи внешней поверхности внутреннего цилиндра.

**2.79.** На отрезке  $CD$  прямого тонкого проводника равномерно распределен заряд с линейной плотностью  $\gamma = 10^{-6}$  Кл/м. Какую работу нужно совершить, чтобы заряд  $q = 6 \cdot 10^{-9}$  Кл перенести из точки  $B$  в точку  $A$  (рис. 2.6).  $CD = DA = AB$ .

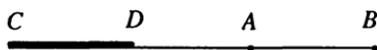


Рис. 2.6

**2.80.** На расстоянии  $r_1 = 4$  см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд  $q = 6 \cdot 10^{-9}$  Кл. Под действием поля заряд перемещается по линии напряженности на расстояние  $r_2 = 2$  см, при этом совершается работа  $A = 5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Найдите линейную плотность заряда нити.

**2.81.** Цилиндр радиусом  $R = 0,2$  см равномерно заряжен; линейная плотность заряда на цилиндре  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$  Кл/м. Какова разность потенциалов между поверхностью цилиндра и точкой  $A$ , равноудаленной от концов цилиндра, если расстояние между точкой  $A$  и осью цилиндра составляет  $r = 0,6$  см?

**2.82.** Определите, как зависит потенциал поля кольца (радиус  $R$ , заряд  $q$ ) на его оси от расстояния  $h$  от центра. Получите выражение

для напряженности поля  $E(h)$  как градиента потенциала  $\varphi(h)$  и сопоставьте его с найденным ранее (см. задачу 2.39).

**2.83.** Определите, как зависит потенциал поля на оси тонкого заряженного диска (радиус  $R$ , заряд  $q$ ) от расстояния  $h$  до его центра. Что дает полученная формула в предельных случаях  $h \gg R$  и  $h \ll R$ ? Найдите напряженность  $E(h)$  как градиент потенциала  $\varphi(h)$  и сравните ее с результатом, полученным в задаче 2.42.

### Движение заряженных частиц в электростатическом поле

**2.84.** В плоский конденсатор, заряженный до напряжения  $U$ , влетает электрон (рис. 2.7, а, б). Каково изменение кинетической энергии электрона, если начальную и конечную энергии электрона рассмотреть на входе и выходе из конденсатора и вдали от конденсатора?

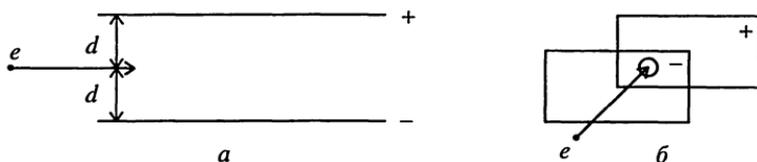


Рис. 2.7

**2.85.** Отрицательный заряд  $q$  приближается из бесконечно удаленной точки к неподвижному положительному заряду  $Q$ . Как изменяются при этом движущегося кинетическая, потенциальная и полная энергии заряда  $q$  в поле заряда  $Q$ ?

**2.86.** Какие траектории возможны (при различных начальных условиях) для электрона, движущегося в однородном поле? Установите аналогию с движением тела в поле силы тяготения.

**2.87.** Каковы возможные траектории движения точечного заряда  $q$  в поле другого точечного заряда  $Q$  противоположного знака? Чем определяется тот или иной характер траектории? Установите аналогию с движением в центральном гравитационном поле.

**2.88.** Как изменится ответ (см. задачу 2.87) если знаки зарядов  $q$  и  $Q$  одинаковы?

**2.89.** Определите кинетическую, потенциальную и полную энергии электрона на первой боровской орбите в атоме водорода ( $r_0 = 5,3 \cdot 10^{-9}$  см).

**2.90.** Медленно движущийся электрон попадает в поле заряженного шара, радиус которого  $R = 10$  см, заряд  $q = 1,1 \cdot 10^{-5}$  Кл. Какую скорость будет иметь электрон, когда он достигнет поверхности шара? Считать, что начальное расстояние электрона от поверхности  $l \gg R$ .

**2.91.** Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U = 6 \cdot 10^6$  В, приобрела скорость 5400 км/ч. Определите массу частицы, если ее заряд равен  $2e$ .

**2.92.** Пылинка массой  $4 \cdot 10^{-10}$  кг с зарядом  $10^{-16}$  Кл попадает в поле заряженного шарика, имея скорость 10 см/с, направленную к центру шарика. На какое расстояние она сможет приблизиться к шарiku, если его заряд равен  $10^{-9}$  Кл?

**2.93.** Электрон с начальной скоростью, равной  $2 \cdot 10^6$  м/с, движется вдоль линии напряженности поля плоского конденсатора. Какова разность потенциалов на обкладках конденсатора, если электрон остановивается, пройдя путь 1,5 см? Расстояние между пластинами 5 см. Сколько времени будет двигаться электрон до остановки?

**2.94.** Между двумя плоскими параллельными пластинами, расположенными вертикально, равномерно падает капелька массой  $10^{-9}$  г; расстояние между пластинами 0,5 см. При наложении на пластины разности потенциалов 400 В капелька падает под углом  $7^\circ 25'$  к вертикали. Предполагая, что скорость пропорциональна действующей силе, определите находящийся на капельке заряд.

**2.95.** Электрон влетел в плоский конденсатор со скоростью  $10^7$  м/с, направленной параллельно пластине. В момент вылета из конденсатора направление скорости электрона составило угол  $35^\circ$  с первоначальным направлением скорости. Определите разность потенциалов между пластинами, если длина пластин 10 см и расстояние между ними 2 см.

**2.96.** Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $5 \cdot 10^3$  В, влетает в середину между пластинами конденсатора параллельно пластине. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к конденсатору, чтобы электрон не вылетел из него? Длина пластин конденсатора 5 см, расстояние между пластинами 0,5 см.

**2.97.** Электрон, движущийся со скоростью  $v_0 = 4 \cdot 10^7$  м/с, влетает в пространство между двумя пластинами параллельно им. Длина пластин конденсатора  $l = 6$  см, расстояние между пластинами  $d = 0,5$  см. К конденсатору приложено напряжение  $U = 40$  В. На сколько увеличится скорость электрона по модулю на выходе из конденсатора по сравнению с начальной?

**2.98.** Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U_0$ , попадает в вакууме в поле цилиндрического конденсатора (радиусы цилиндров  $R_1$  и  $R_2$ ). Скорость электрона в начальный момент перпендикулярна плоскости, проходящей через ось конденсатора. При каком напряжении  $U$  между обкладками конденсатора электрон будет двигаться внутри конденсатора по окружности?

**2.99.** Длинная заряженная нить (радиус  $R$ , линейная плотность заряда  $\eta$ ) нагрета и испускает электроны. Определите скорость электрона на расстоянии  $r$  от центра нити, считая начальную скорость вылетевших электронов равной нулю (это обычно близко к истине)

и пренебрегая полем других вылетевших электронов (это часто не выполняется).

### Собственная электростатическая энергия системы зарядов

**2.100.** Три точечных заряда  $q_1, q_2, q_3$  расположены в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны  $a$ . Какова потенциальная энергия этой системы зарядов? Какова потенциальная энергия заряда  $q_1$  ( $q_2$  или  $q_3$ ) в поле двух других зарядов?

**2.101.** Какую работу надо совершить, чтобы построить конфигурацию зарядов, показанную на рисунке 2.8,  $a, б, в$ , перемещая каждый заряд из бесконечности? Заряды расположены в вершинах квадрата со стороной  $a$ .

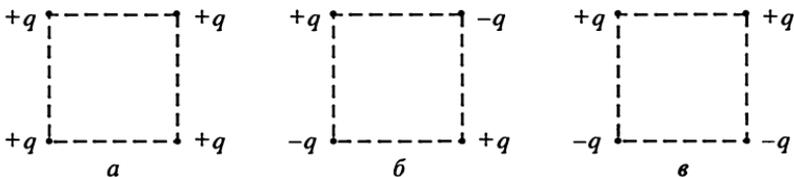


Рис. 2.8

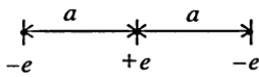


Рис. 2.9

**2.102.** Вычислите потенциальную энергию конфигурации зарядов (рис. 2.9). Расстояние между зарядами одинаково и равно  $a$ .

**2.103.** Найдите такое расположение одного протона и двух электронов на одной прямой, при котором потенциальная энергия системы зарядов равна нулю.

**2.104.** Восемь протонов находятся в вершинах куба с ребром  $a$ . Какова будет максимальная скорость протонов, если их предоставить самим себе?

**2.105.** Какую работу необходимо совершить, чтобы металлической сфере радиусом  $R$  сообщить заряд  $Q$ , постепенно перенося части этого заряда из бесконечности на сферу? Воспользовавшись формулой для объемной плотности энергии электростатического поля, рассчитайте собственную электростатическую энергию сферы радиусом  $R$ , по которой равномерно распределен заряд  $Q$ . Сравните оба результата.

**2.106.** Два маленьких одинаковых металлических шарика радиусом  $R$ , удаленные друг от друга на расстояние  $l \gg R$ , имеют заряды  $q$  и  $Q$  соответственно и практически не взаимодействуют. Шарики соединяют тонкой проволокой и через некоторое время проволоку убирают. Теперь шарики явно взаимодействуют. Как объяснить этот опыт с точки зрения закона сохранения энергии?

**2.107.** Вычислите собственную электростатическую энергию шара радиусом  $R$ , заряженного с постоянной объемной плотностью, если полный заряд шара равен  $Q$ .

**2.108.** В начале нашего столетия существовала гипотеза чисто электрического происхождения массы покоя электрона  $m$ . Представьте себе электрон в виде шарика радиусом  $r_0$ , заряженного с постоянной объемной плотностью. Собственная электростатическая энергия такого шарика известна из решения предыдущей задачи. На основе положения специальной теории относительности об эквивалентности энергии и массы приравняйте эту энергию энергии покоя электрона  $mc^2$  и найдите радиус  $r_0$ . Величина  $r_0$  получила название классического радиуса электрона. (У этой модели электрона один существенный недостаток: неясно, почему электрон не разваливается под действием сил электростатического отталкивания.)

**2.109.** Ядра тяжелых атомов приближенно можно рассматривать как шары, заряженные с постоянной объемной плотностью  $\rho = 1,3 \cdot 10^{25}$  Кл/м<sup>3</sup>. Определите изменение собственной электростатической энергии, происходящее при делении ядра урана с зарядом  $Q = 92e$  на два ядра-осколка с одинаковыми зарядами и радиусами  $R$ , которые разлетаются на большое расстояние друг от друга. Выразите ответ в джоулях и мегаэлектронвольтах.

## 2.2. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**2.110.** Двум одинаковым металлическим шарам сообщили равные по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды. Как при этом изменилась масса шаров?

**2.111.** Как, имея отрицательно заряженный проводник, зарядить положительно другой проводник, не меняя заряд первого?

**2.112.** Незаряженный металлический шар помещают в однородное электрическое поле. Покажите значками «+» и «-» разного размера, как распределятся наведенные на шаре заряды. Нарисуйте линии напряженности и эквипотенциальные поверхности результирующего поля, создаваемого внешними и наведенными зарядами.

**2.113.** Два металлических шара одинакового радиуса расположены на небольшом расстоянии друг от друга. С одинаковой ли по модулю силой будут взаимодействовать шары в случаях, когда они заряжены одноименно и разноименно?

**2.114.** Внутри проводящей незаряженной, заземленной сферы помещен положительный заряд  $q$ . Каково будет распределение зарядов на сфере? Какой по модулю заряд индуцируется на ней? Нарисуйте карти-

ну линий напряженности. Как изменится эта картина, если сферу не заземлять? Какие изменения будут происходить, если перемещать заряд  $q$ ?

**2.115.** Две одинаковые металлические пластины параллельны и расположены близко друг от друга; им сообщают отрицательные заряды, произвольные по модулю. Так как эти заряды отталкиваются, то можно предположить, что они соберутся на внешних поверхностях пластин. Верно ли это? Какому условию подчиняется распределение зарядов на пластинах?

**2.116.** В установках для улавливания пыли воздух пропускают сквозь металлические трубы, по оси которых протянута металлическая проволока. Труба заземляется, а на проволоке создают отрицательный потенциал относительно Земли. Как будут вести себя пылинки: а) незаряженные, б) заряженные положительно или отрицательно?

**2.117.** Маленький уединенный металлический шарик зарядили положительным зарядом до потенциала  $1 \text{ В}$ , а затем внесли его внутрь металлической сферы, заряженной до потенциала  $1000 \text{ В}$ . В каком направлении будут перемещаться заряды при соприкосновении шарика с внутренней поверхностью сферы? Не противоречит ли это утверждению о том, что положительный заряд движется в поле от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом?

**2.118.** Полый металлический шар  $A$ , имеющий небольшое отверстие, заряжен положительно. Как известно, на внутренней поверхности такого шара заряды отсутствуют. Зарядится ли шар  $B$ , если соединить его проволокой с внутренней поверхностью шара  $A$ ? Зарядится ли шар  $B$ , если вместо проволоки использовать маленький шарик: коснуться им внутренней поверхности шара  $A$ , а затем шара  $B$ , и повторить эту операцию много раз?

**2.119.** Полый шар радиусом  $R$  имеет заряд  $Q$ , в шаре имеется малое отверстие. Как будет меняться потенциал шара, если точечный заряд  $q$  перемещать из бесконечности через отверстие внутрь шара?

**2.120.** Металл, как известно, состоит из решетки, в узлах которой находятся ионы, и свободных электронов. Электрическое поле вблизи каждого иона очень велико, почему же мы считаем, что напряженность поля в металле равна нулю? Почему в таком случае свободные электроны не покидают металл?

**2.121.** Два равных разноименных точечных заряда расположены на неизменном расстоянии друг от друга. Как изменится сила, действующая на заряды, и напряженность поля, если оба заряда окружить тонкими металлическими, изолированными от Земли оболочками, совпадающими с эквипотенциальными поверхностями; если эти оболочки соединить проводником?

**2.122.** Незаряженный металлический шар помещают в плоский конденсатор, заряженный до напряжения  $U$ . Каков потенциал шара относительно отрицательно заряженной пластины конденсатора, если

расстояние от центра шара до этой пластины равно  $x$ , а расстояние между пластинами равно  $d$ ?

**2.123.** Шарик радиусом 1 см заряжен до потенциала 300 В. Сколько электронов надо удалить с шарика для такой электризации? На сколько при этом уменьшается масса шарика?

**2.124.** Заряженный металлический шар (заряд  $q$ , радиус  $R$ ) помещен внутрь незаряженного металлического шарового слоя (радиусы  $2R$  и  $3R$ ) так, что центры всех сферических поверхностей совпадают. Выясните, каков характер зависимостей  $E(r)$  и  $\varphi(r)$ ; постройте графики этих зависимостей; изобразите линии напряженности и эквипотенциальные поверхности.

**2.125.** Система состоит из двух концентрических проводящих сфер, причем на внутренней сфере радиусом  $R_1$  находится положительный заряд  $q_1$ . Какой заряд  $q_2$  следует поместить на внешнюю сферу радиусом  $R_2$ , чтобы потенциал внутренней сферы оказался равным нулю? Как будет зависеть при этом потенциал  $\varphi$  от расстояния  $r$  до центра системы? Изобразите примерный график этой зависимости.

**2.126.** Металлический шар радиусом  $R_1$ , имеющий потенциал  $\varphi_1$ , окружают сферической проводящей оболочкой радиусом  $R_2$ . Чему будет равен потенциал шара, если заземлить оболочку?

**2.127.** Из трех концентрических бесконечно тонких металлических сфер радиусами  $R_1 < R_2 < R_3$ , находящихся в вакууме, крайние заземлены, а средней сообщен заряд  $Q$ . Определите напряженность электрического поля во всем пространстве.

**2.128.** Определите потенциал незаряженного металлического шара радиусом  $r$ , расположенного на расстоянии  $d$  от точечного заряда  $q$ . Каким станет потенциал шара, если его заземлить? Какой заряд будет при этом на шаре?

**2.129.** Внутри полой проводящей сферы радиусом  $R$  с зарядом  $Q$  через маленькое отверстие внесено заряженное тело с зарядом  $-q$ . Чему равен потенциал точки, находящейся на расстоянии  $r > R$  от центра шара?

**2.130.** Две плоские металлические пластины площадью  $S$  помещены в вакууме параллельно друг другу на небольшом расстоянии. Первая имеет заряд  $q_1$ , вторая  $-q_2$ . Вычислите поверхностные плотности заряда на обеих сторонах каждой пластины и напряженность поля между ними и во внешнем пространстве вблизи пластин.

**2.131.** Заряженная металлическая пластинка находится в электрическом поле. Слева от пластинки напряженность результирующего поля равна  $\vec{E}_1$ , а справа  $-\vec{E}_2$  (рис. 2.10). Какая сила действует на пластинку, если ее заряд равен  $q$ ?

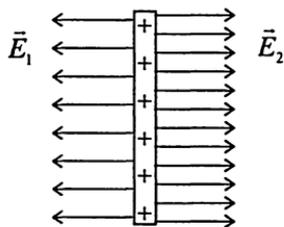


Рис. 2.10

**2.132.** Две широкие металлические пластины расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d$  и их края соединены проводом. Между пластинами на расстоянии  $d/3$  от одной из них натянута тонкая пленка, равномерно заряженная с поверхностной плотностью  $\sigma$ . Определите напряженности  $E_1$  и  $E_2$  поля вблизи пластин.

**2.133.** На металлическом шарике радиусом  $R = 1,5$  см имеется заряд  $q = 10$  мкКл. Определите результирующую силу, действующую на заряд, расположенный на одной половине шарика.

**2.134.** Как изменится напряженность поля точечного заряда  $q$  в некоторой точке  $A$ , если в непосредственной близости от этой точки поместить проводящую заземленную пластину, плоскость которой перпендикулярна прямой, на которой расположены точка  $A$  и заряд?

**2.135.** Точечный заряд  $q$  расположен на расстоянии  $a$  от большой металлической незаряженной пластины. Определите силу взаимодействия заряда и пластины, полный заряд на обеих сторонах пластины и поверхностную плотность заряда на пластине.

**2.136.** Точечные заряды  $q_1 = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $q_2 = 10^{-9}$  Кл находятся на расстоянии  $d_1 = 4,6$  см друг от друга. Посередине между ними помещена плоская проводящая заземленная пластина толщиной  $d_2 = 2$  см так, что заряды  $q_1$  и  $q_2$  расположены на прямой, перпендикулярной поверхности пластины. Определите силу, действующую на пластину. Как изменится эта сила, если пластина будет толще? Объясните, почему сила взаимодействия между зарядами зависит от толщины пластины.

**2.137.** Точечный заряд  $q = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл расположен на расстоянии  $l = 5$  см от проводящей заземленной стенки. Определите напряженность поля в точке  $A$ , отстоящей от заряда  $q$  и от стенки на одинаковом расстоянии  $l$  (рис. 2.11).

**2.138.** Небольшое облако, несущее заряд  $q = 20$  Кл, находится на высоте  $h = 1$  км над поверхностью Земли. Считая Землю проводником, определите напряженность поля, создаваемую этим зарядом на расстоянии  $s = 3$  км от места, над которым находится облако. Кривизной поверхности Земли пренебречь.

**2.139.** Методом изображений найдите силу, действующую на заряд  $q$ , помещенный на расстояниях  $a$  и  $b$  от двух проводящих полуплоскостей, образующих между собой прямой угол.

**2.140.** Тонкая бесконечно длинная нить расположена параллельно безграничной проводящей плоскости. Линейная плотность заряда нити  $\gamma$ . Расстояние между нитью и плоскостью равно  $l$ . Определите: а) силу, действующую на единицу длины нити; б) распределение поверхностной плотности заряда  $\sigma(x)$  на плоскости, где  $x$  – расстояние от плоскости, перпендикулярной к проводящей поверхности и проходящей через нить.

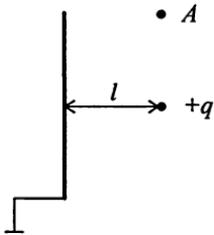


Рис. 2.11

**2.141.** Докажите, что работа удаления точечного заряда от равного ему по модулю точечного заряда противоположного знака в бесконечность в 4 раза больше работы удаления того же заряда в бесконечность от бесконечной проводящей заземленной стенки, расположенной на таком же расстоянии, как и точечные заряды.

**2.142.** Частица с зарядом  $q$ , в начальный момент времени закрепленная на расстоянии  $x_0$  от поверхности заземленной металлической пластины, освобождается и начинает двигаться к этой поверхности. Как зависит кинетическая энергия частицы от расстояния  $x$  до поверхности? Чем ограничивается рост энергии при  $x \rightarrow 0$ ? Оцените энергию (в электронвольтах), которой может достичь электрон, освобожденный на достаточно большом расстоянии от пластины.

### 2.3. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**2.143.** Пластины из диэлектрика внесли в заряженный плоский конденсатор. Получатся ли два разноименно заряженных куска диэлектрика, если, не вынимая пластину из конденсатора, распилить ее параллельно обкладкам конденсатора?

**2.144.** Что можно сказать о молекулах диэлектрика, если известно, что его диэлектрическая проницаемость значительно изменяется с температурой? Если эта зависимость очень слаба?

**2.145.** Обкладки заряженного и отсоединенного от источника плоского конденсатора притягиваются с силой  $\vec{F}$ . Как изменится сила, действующая на обкладку конденсатора, если в него внести пластину из диэлектрика? Как изменится эта сила, если первоначально конденсатор от источника напряжения не был отсоединен?

**2.146.** Пластина из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  помещена в заряженный и отсоединенный от источника плоский конденсатор. Какова напряженность поля, существующего в узкой и длинной щели в диэлектрике, если она прорезана: а) параллельно пластинам конденсатора; б) перпендикулярно пластинам? Напряженность поля до внесения диэлектрика была равна  $E$ .

**2.147.** Изобразите линии напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и линии электрического смещения  $\vec{D}$  в следующих случаях: а) клин из диэлектрика помещен между пластинами заряженного плоского конденсатора (рис. 2.12, а); б) пластина из диэлектрика помещена в заряженный плоский конденсатор (рис. 2.12, б).

**2.148.** Нарисуйте приблизительно расположение линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей, отличающихся на постоянную разность потенциалов, для положительно заряженного металлического шара, наполовину погруженного в керосин.

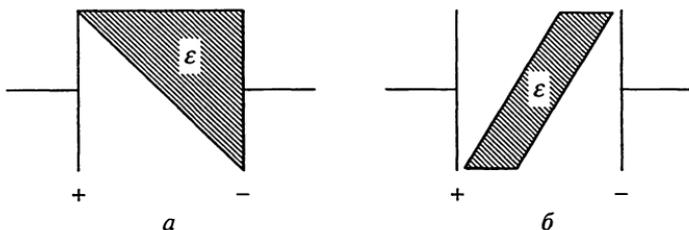


Рис. 2.12

**2.149.** На металлическом шаре радиусом  $R$  имеется заряд  $Q$ . Шар концентрически окружен сферическим диэлектрическим слоем (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ) с внутренним радиусом  $2R$  и внешним  $3R$ . Изобразите примерные графики зависимости напряженности и потенциала поля от расстояния до центра шара. Вычислите поверхностную плотность заряда и суммарный заряд на внутренней и внешней поверхностях сферического слоя.

**2.150.** Определите плотность связанных зарядов на поверхностях слюдяной пластинки толщиной  $0,2$  мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, заряженном до напряжения  $400$  В.

**2.151.** В середину плоского конденсатора с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$  на пластинах внесли диэлектрическую пластину толщиной  $b$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Нарисуйте графики напряженности и потенциала поля как функций расстояния от отрицательно заряженной пластины. Расстояние между пластинами конденсатора равно  $3b$ . Вычислите плотность связанных зарядов на поверхности диэлектрика и его поляризованность.

**2.152.** Диэлектрическая пластина толщиной  $l_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  введена между обкладками плоского конденсатора (рис. 2.13). Между поверхностями пластины и обкладками конденсатора остались воздушные зазоры, суммарная толщина которых равна  $l_1$ . Определите силу притяжения  $F$  между пластинами, если разность потенциалов между ними равна  $U$ , а площадь пластин  $S$ . Какой вид будет иметь выражение для  $F$  в предельном случае  $l_1 \rightarrow 0$ ?

**2.153.** Две плоские пластины площадью  $200$  см<sup>2</sup> каждая, заряженные равными по модулю и противоположными по знаку зарядами, притягиваются, находясь в керосине, с силой  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Н. Расстояние между пластинами столь мало, что напряженность поля можно рассчитать по формуле для бесконечных плоскостей. Определите: а) находящиеся на пластинах заряды; б) индукцию поля в керосине.

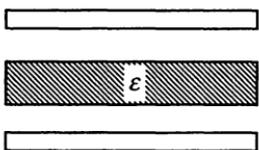


Рис. 2.13

**2.154.** Горизонтально расположенным пластинам сообщили противоположные по знаку заряды, модуль которых равен  $2,7 \cdot 10^{-7}$  Кл.

Пластины расположены так близко, что поле между ними можно считать однородным. Нижняя пластина погружена в жидкий диэлектрик ( $\epsilon = 3$ ). Площадь каждой из пластин  $300 \text{ см}^2$ . Определите силы, действующие на пластины и на поверхность жидкости.

**2.155.** У поверхности фарфоровой пластинки напряженность поля в воздухе равна по модулю  $200 \text{ В/см}$  и образует с нормалью к поверхности угол  $40^\circ$ . Определите: а) угол между направлением вектора напряженности поля внутри пластинки и нормалью к пластинке; б) напряженность поля в фарфоре; в) плотность связанных зарядов на границе фарфор – воздух.

**2.156.** Внутри шара из изотропного диэлектрика ( $\epsilon = 7$ ) создано однородное электрическое поле с напряженностью  $E = 10^4 \text{ В/м}$ . Какова максимальная поверхностная плотность связанных зарядов  $\sigma_{\text{max}}$ ?

**2.157.** В керосине на глубине  $h = 3 \text{ см}$  от свободной поверхности находится точечный заряд  $q = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . Определите: а) плотность связанных зарядов на поверхности керосина над зарядом и на расстоянии  $d = 5 \text{ см}$  от заряда; б) общий связанный заряд на поверхности керосина; в) силу, действующую на заряд  $q$  со стороны связанных зарядов.

**2.158.** Два однородных диэлектрика с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  граничат друг с другом вдоль бесконечной плоскости. В первом диэлектрике на расстоянии  $h$  от границы раздела помещен точечный заряд  $q$ . Определите напряженность электрического поля в каждом из диэлектриков.

**2.159.** Две коаксиальные трубки радиусами  $r$  и  $R$  погружаются вертикально в масло плотностью  $\rho$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Между трубками поддерживается постоянная разность потенциалов  $U$ . На какую высоту поднимется масло между трубками?

## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

**2.160.** Заряженный металлический шар присоединен к электрометру. Как и почему будут меняться показания электрометра, если шар подносить близко к проводящим заземленным предметам?

**2.161.** В середину плоского конденсатора поместили тонкую металлическую пластину. Как изменится емкость конденсатора? Как она изменится, если пластину соединить проволокой с одной из обкладок?

**2.162.** Как изменится емкость плоского конденсатора, если параллельно обкладкам внести в него пластину из диэлектрика ( $\epsilon = 2$ ) толщиной, равной половине расстояния между обкладками?

**2.163.** Обкладки плоского воздушного конденсатора присоединены к аккумулятору. Уменьшится ли напряженность поля в конденсаторе, если поместить его в непроводящую жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ ?

**2.164.** Когда конденсатор присоединили к батарее, он приобрел энергию 1 Дж. Какую работу совершила батарея? Какая энергия выделилась в виде теплоты?

**2.165.** Какие допущения обычно делаются при рассмотрении электрического поля в плоском конденсаторе? Нарисуйте картину линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей для поля в реальном плоском конденсаторе.

**2.166.** Определите электрическую емкость Земли. Почему потенциал Земли обычно полагают равным нулю?

**2.167.** Уединенный шаровой проводник радиусом  $R_1$  окружен прилегающим к нему концентрическим слоем однородного диэлектрика с проницаемостью  $\epsilon$  и наружным радиусом  $R_2$ . Чему равна емкость этого проводника?

**2.168.** Металлический шар ( $R = 3$  см) опущен наполовину в керосин. Каков его заряд, если он заряжен до потенциала  $\varphi = 1800$  В?

**2.169.** Два шара, один радиусом  $R_1 = 5$  см с зарядом  $q_1 = 0,80$  нКл, другой радиусом  $R_2 = 10$  см с зарядом  $q_2 = 2$  нКл, соединяют длинной проволокой. Какой заряд переместится по ней? Чему будет равен общий потенциал шаров после соединения?

**2.170.** Заряженный до потенциала  $\varphi_1 = 300$  В шар радиусом  $R_1 = 15$  см соединили с незаряженным шаром длинной тонкой проволокой. После соединения потенциал шара оказался равным  $\varphi_2 = 100$  В. Каков радиус второго шара?

**2.171.** Две плоские пластины площадью  $S = 200$  см<sup>2</sup> каждая, заряженные равными по модулю зарядами, притягиваются в керосине с силой  $F = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Н. Расстояние между пластинами очень мало. Определите находящиеся на них заряды.

**2.172.** Плоский конденсатор заряжают от батареи, которую затем отключают. Между обкладками помещают пластину из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Как изменились при этом заряд и разность потенциалов на обкладках, напряженность поля, емкость конденсатора и запасенная в нем энергия? Почему изменилась энергия? Ответьте на те же вопросы в случае, если конденсатор не отключается от батареи.

**2.173.** Плоский конденсатор имеет в качестве изолирующего слоя стеклянную пластинку толщиной  $d = 2$  см и площадью  $S = 300$  см<sup>2</sup>. Конденсатор заряжен до разности потенциалов  $U = 100$  В, после чего отключен от источника напряжения. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы вынуть стеклянную пластинку из конденсатора (трение не учитывается).

**2.174.** Какую работу надо совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками плоского конденсатора вдвое? Начальная разность потенциалов  $U$ , а емкость конденсатора  $C$ . Рассмотрите два случая:

а) источник напряжения отсоединен от конденсатора; б) конденсатор присоединен к источнику напряжения.

**2.175.** Два одинаковых металлических диска диаметром  $D = 0,1$  м расположены параллельно друг другу и разделены парафинированной бумагой толщиной  $d = = 2 \cdot 10^{-4}$  м. Диски сдвинуты так, что центр одного из них находится против края другого (рис. 2.14). Определите емкость такой системы.

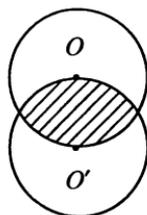


Рис. 2.14

**2.176.** Между обкладками плоского конденсатора площадью  $S = 500$  см<sup>2</sup> каждая находится металлическая пластинка такой же площади. Расстояние между обкладками конденсатора  $d = 5$  см, толщина пластинки  $d_1 = 1$  см. Какую работу нужно совершить, чтобы извлечь эту пластинку из конденсатора, если он подключен к источнику, создающему на обкладках конденсатора напряжение  $U = 100$  В?

**2.177.** На одной из пластин плоского конденсатора емкостью  $C$  находится заряд  $+q$ , а на другой  $+4q$ . Определите разность потенциалов между пластинами конденсатора.

**2.178.** При изучении фотоэлектрических явлений используют сферический конденсатор, состоящий из центрального катода – металлического шарика диаметром  $d_1 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м и анода – внутренней поверхности сферической колбы диаметром  $d_2 = 0,11$  м, посеребренной изнутри. Найдите емкость такого конденсатора.

**2.179.** Рассчитайте емкость единицы длины бесконечного цилиндрического конденсатора, если радиус его внутреннего цилиндра  $R_1$ , внешнего  $R_2$ . Какова напряженность поля вблизи внутреннего цилиндра, если напряжение на конденсаторе  $U = 5$  кВ,  $R_1 = 0,2$  см,  $R_2 = 1$  см?

**2.180.** Определите емкость конденсаторов (рис. 2.15, а, б, в) при известных величинах  $S$ ,  $d$ ,  $\epsilon$ .

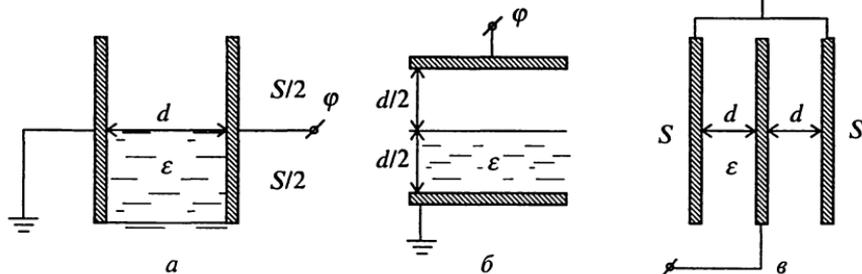


Рис. 2.15

**2.181.** Определите емкость плоского конденсатора, между обкладками которого находится стеклянная пластинка толщиной  $d_1 = 10^{-4}$  м, покрытая с обеих сторон слоем парафина толщиной  $d_2 = 2 \cdot 10^{-5}$  м. Площадь каждой обкладки конденсатора  $S = 0,02$  м<sup>2</sup>.

**2.182.** Определите емкость батареи из одинаковых конденсаторов (рис. 2.16, а, б).

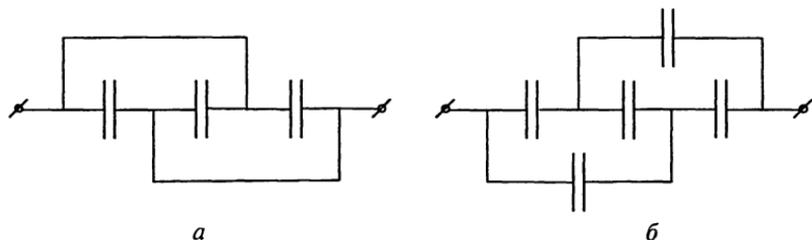


Рис. 2.16

**2.183.** Батарея из двух последовательно соединенных конденсаторов с емкостями  $C_1 = 300$  пФ и  $C_2 = 500$  пФ заряжена до разности потенциалов 1200 В. Определите: а) разность потенциалов на первом и втором конденсаторах; б) заряд на обкладках.

**2.184.** На систему конденсаторов (рис. 2.17) подано напряжение  $U = 200$  В. Заряд, сообщенный системе, оказался равным  $q = 6 \cdot 10^{-4}$  Кл. Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  соответственно равны 4 и 8 мкФ. Определите емкость конденсатора  $C_3$  и энергию каждого конденсатора.

**2.185.** Разность потенциалов 60 кВ на батарее из 5 последовательно соединенных конденсаторов емкостью 400 пФ каждый, поддерживают постоянной. При этом один из конденсаторов пробивается. Определите: а) изменение энергии этой батареи конденсаторов; б) энергию, которая выделяется при разряде батареи; в) работу источника напряжения.

**2.186.** В схеме (рис. 2.18) емкость батареи конденсаторов не изменяется при замыкании ключа. Определите емкость  $C_x$  ( $C$  – известная емкость).

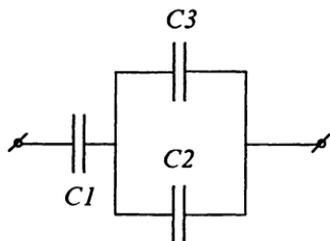


Рис. 2.17

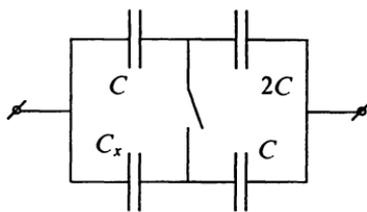


Рис. 2.18

**2.187.** Чему равна емкость бесконечной цепи, которая образована повторением одного и того же звена, состоящего из двух одинаковых конденсаторов емкостью  $C$  (рис. 2.19)?

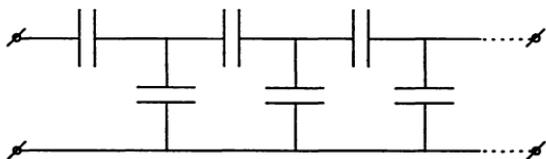


Рис. 2.19

**2.188.** Два длинных прямых провода с одинаковым радиусом сечения расположены в воздухе параллельно друг другу. Расстояние между их осями равно  $b$ . Определите взаимную емкость проводов на единицу их длины при условии  $b \gg a$ .

**2.189.** Длинный прямой провод расположен параллельно безграничной проводящей плоскости на расстоянии  $b$  от нее. Радиус сечения провода равен  $a$ . Определите взаимную емкость этой системы на единицу длины провода при условии  $b \gg a$ .

**2.190.** Чему равна емкость системы из двух одинаковых металлических шариков радиусом  $a$ ? Расстояние между центрами шариков  $b \gg a$ ; система находится в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

**2.191.** Определите емкость системы, которая состоит из металлического шарика радиусом  $a$  и безграничной проводящей плоскости, отстоящей от центра шарика на расстоянии  $b \gg a$ .

## 2.5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

**Сила электрического тока, плотность тока.  
Электрическое сопротивление проводников**

**2.192.** Как должны быть распределены заряды по поверхности бесконечно длинного цилиндра, чтобы напряженность электрического поля внутри цилиндра была везде одинакова и направлена вдоль его оси?

**2.193.** Изобразите картину линий напряженности электрического поля вблизи проводника, по которому течет постоянный электрический ток: а) для прямого проводника, б) для проводника, согнутого в виде дуги.

**2.194.** В плоский конденсатор, присоединенный к источнику, вдвигают с постоянной скоростью диэлектрическую пластинку, запол-

няющую пространство между обкладками. От чего зависит ток, текущий при этом в подводящих проводах?

**2.195.** Сплошной металлический цилиндр вращается вокруг своей оси. Ось цилиндра и его боковая поверхность соединены проводом. Идет ли по этому проводу ток?

**2.196.** Как изменится дрейфовая скорость носителей заряда и сила тока, если при неизменной разности потенциалов на концах проводника увеличить вдвое: а) длину проводника; б) площадь поперечного сечения проводника?

**2.197.** Воздушный цилиндрический конденсатор, подключенный к источнику постоянного напряжения  $U = 200$  В, погружают в вертикальном положении в сосуд с дистиллированной водой со скоростью  $v = 5$  мм/с. Зазор между обкладками конденсатора  $d = 2$  мм, средний радиус кривизны обкладок  $r = 50$  мм. Имея в виду, что  $d \ll r$ , найдите силу тока в подводящих проводах.

**2.198.** В электронной лампе ток идет от металлического цилиндра к накаливаемой нити, расположенной по его оси. Определите плотность тока вблизи цилиндра и вблизи нити, если сила тока равна 3 мА; длина нити и длина цилиндра равны 2,5 см; диаметр нити и диаметр цилиндра соответственно равны 0,02 мм и 1 см.

**2.199.** От выключателя к электрической лампе ведет медный провод, площадь поперечного сечения которого  $S = 1$  мм<sup>2</sup> и длина  $l = 3$  м. Через какое время электрон, находящийся у выключателя, достигнет лампочки, если сила тока  $I = 1$  А, а концентрация электронов в меди  $n = 10^{23}$  см<sup>-3</sup>. Не противоречит ли результат этой оценки нашему обычному опыту?

**2.200.** Имеется моток медной проволоки с площадью поперечного сечения 0,1 мм<sup>2</sup>. Масса всей проволоки составляет 0,3 кг. Определите сопротивление проволоки.

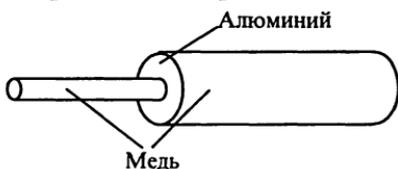


Рис. 2.20

**2.201.** Ток идет от медной трубки радиусом  $r_1 = 2$  мм к медной трубке радиусом  $r_2 = 4$  см по плоской алюминиевой фольге толщиной  $d = 0,1$  мм (рис. 2.20). Каково сопротивление фольги?

**2.202.** Металлический шар радиусом  $a$  окружен концентрической тонкой металлической оболочкой радиусом  $b$ . Пространство между этими электродами заполнено однородной слабо проводящей средой с удельным сопротивлением  $\rho$ . Определите сопротивление межэлектродного пространства. Исследуйте полученное выражение при  $b \rightarrow \infty$ .

**2.203.** В неограниченной среде, удельное сопротивление которой равно  $\rho = 100$  Ом·м, находится металлический шар диаметром  $d = 10$  см.

Каково сопротивление системы шар – неограниченная среда? (Таково же приблизительно сопротивление заземления, выполненного в виде шара такого же диаметра, закопанного в почву с указанным удельным сопротивлением.)

**2.204.** Однородная, слабо проводящая среда с удельным сопротивлением  $\rho$  заполняет пространство между двумя коаксиальными идеально проводящими тонкими цилиндрами. Радиусы цилиндров  $a$  и  $b$ , длина каждого цилиндра  $l$ . Пренебрегая краевыми эффектами, найдите сопротивление среды между цилиндрами.

**2.205.** Проводник из вещества с удельным сопротивлением  $\rho$  имеет форму усеченного конуса, высота которого  $h$ , а радиусы верхнего и нижнего оснований  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ). Определите сопротивление этого проводника между его основаниями.

**2.206.** Обмотка электромагнитов в электрической машине сделана из медного провода и при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  имеет сопротивление  $R_1 = 14,2$  Ом. После работы сопротивление обмотки повысилось до  $R_2 = 16,5$  Ом. Какова при этом температура  $t_2$  обмотки?

**2.207.** Угольный и железный стержни одинаковой толщины соединены последовательно. При каком соотношении их длин сопротивление этой комбинации не зависит от температуры?

**2.208.** Сопротивление волоска горячей лампы накаливания в 10 раз больше, чем сопротивление волоска выключенной лампы (при комнатной температуре). Считая температуру волоска горячей лампы равной  $1000^\circ\text{C}$ , определите температурный коэффициент сопротивления.

### Закон Ома в дифференциальной форме

**2.209.** По проводнику переменного сечения (рис. 2.21) течет постоянный ток. Одинаковы ли значения напряженности в широком и узком сечениях? Изобразите распределение потенциала по длине проводника.

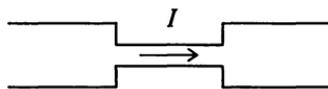


Рис. 2.21

**2.210.** Плоский конденсатор с диэлектриком в виде парафинированной бумаги ( $\epsilon = 2$ ) через  $\tau = 10$  мин сохранил заряд  $q = 0,1 q_0$  ( $q_0$  – начальный заряд). Предполагая, что утечка произошла только сквозь парафинированную бумагу, вычислите ее удельное сопротивление.

**2.211.** Цилиндрический конденсатор, радиусы обкладок которого  $R_1$  и  $R_2$ , заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и удельным сопротивлением  $\rho$ . Какова плотность тока на расстоянии  $r$  от оси конденсатора через промежуток времени  $\tau$  после отключения конденсатора от источника с ЭДС  $\mathcal{E}_0$ ?

**2.212.** Проводящий заряженный шар радиусом  $a$  погружен в неограниченную однородную среду с проводимостью  $\gamma$  и диэлектрической

проницаемостью  $\epsilon$ . По какому закону будет убывать со временем со-общенный шару заряд? Через какое время  $\tau$  заряд уменьшится вдвое? Какова будет в этот момент плотность тока у поверхности шара?

**2.213.** Через какое время заряженный плоский конденсатор с площадью обкладок  $S$  полностью разрядится, если его диэлектрик имеет проводимость  $\gamma$  и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ ? Можно считать, что конденсатор полностью разрядился, если он потерял 90% своего начального заряда  $q_0$ . Какова в конце разряда плотность тока утечки?

**2.214.** В растворе медного купороса ( $\rho = 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) ток идет между двумя медными проволоками, оси которых расположены параллельно друг другу на расстоянии 13 см. Радиус проволоки 4 мм. Между проволоками поддерживается напряжение 12 В. Определите плотность тока: а) на середине расстояния между проволоками; б) в точке, отстоящей на 10 см от осей обеих проволок. Определите силу тока, принимая, что длина проволок 15 см и равна глубине слоя раствора; размеры сосуда весьма велики.

**2.215.** Металлический шар радиусом  $a$  находится на расстоянии  $l \gg a$  от безграничной идеально проводящей плоскости. Пространство вокруг шара заполнено однородной слабо проводящей средой с удельным сопротивлением  $\rho$ . Найдите: а) плотность тока у проводящей плоскости как функцию расстояния  $r$  от центра шара, если разность потенциалов между шаром и плоскостью равна  $U$ ; б) сопротивление среды между шаром и плоскостью.

### Закон Ома в интегральной форме

**2.216.** Постройте потенциальные диаграммы для участков цепей (рис. 2.22, а – в) и полных цепей (рис. 2.22, з, д). Для участков цепей запишите закон Ома и объясните физический смысл различий в полученных выражениях. Для цепей, схематически изображенных на рисунке 2.22, з, д, запишите закон Ома для полной цепи и проанализируйте соответствующие потенциальные диаграммы.

**2.217.** При каких условиях напряжение на зажимах батареи может быть больше, чем ее ЭДС?

**2.218.** Возможно ли, в принципе, имея неограниченное число батареек от карманного фонаря, получить бесконечно большой ток в нагрузке?

**2.219.** С помощью вольтметра и микроамперметра хотели измерить сопротивление  $R$  проводника, но по ошибке приборы перепутали местами. Тем не менее стрелки обоих приборов отклонились. Можно ли по их показаниям найти значение сопротивления?

**2.220.** В схеме (рис. 2.23) ключ может быть разомкнут или замкнут. В каком случае амперметр покажет большую силу тока, а вольтметр – большее напряжение?

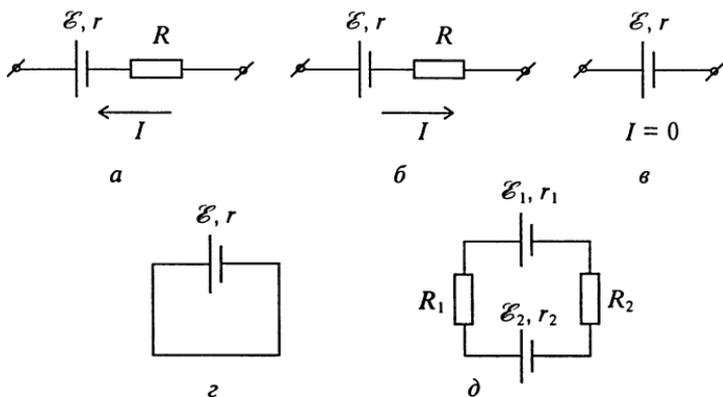


Рис. 2.22

**2.221.** Если вольтметр соединить последовательно с проводником сопротивлением  $R = 10$  кОм, то при напряжении  $U_0 = 120$  В он покажет  $U_1 = 50$  В. Если соединить его последовательно с проводником неизвестного сопротивления  $R_x$ , то он при том же напряжении покажет  $U_2 = 10$  В. Определите сопротивление  $R_x$ .

**2.222.** При силе тока  $0,5$  А напряжение на участке некоторой цепи равно  $8$  В. При силе тока  $1,5$  А напряжение на этом же участке равно  $20$  В. Определите ЭДС, действующую на этом участке. Каким будет напряжение, если сила тока уменьшится до  $0,1$  А?

**2.223.** Гальванический элемент создает в проводнике сопротивлением  $4$  Ом силу тока  $0,2$  А. Если же сопротивление проводника равно  $7$  Ом, то сила тока оказывается равной  $0,14$  А. Какой будет сила тока, если элемент замкнуть накоротко?

**2.224** Зарядка батареи аккумуляторов происходила при силе тока  $3$  А. В конце зарядки присоединенный к батарее вольтметр показал напряжение  $4,25$  В. В начале разрядки той же батареи при силе тока  $4$  А вольтметр показывал напряжение  $3,9$  В. Сопротивление вольтметра очень велико. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление батареи.

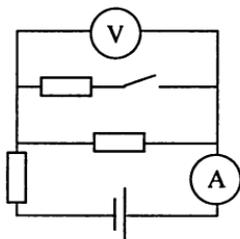


Рис. 2.23

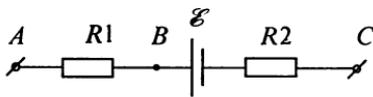


Рис. 2.24

**2.225.** Участок цепи (рис. 2.24) содержит последовательно соединенные резисторы  $R_1$  и  $R_2$ , сопротивления которых  $R_1 = 3,7 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5,6 \text{ Ом}$ , и источник с ЭДС  $\mathcal{E} = 5 \text{ В}$ . Внутреннее сопротивление источника пренебрежимо мало. Сила тока в участке цепи  $I = 1 \text{ А}$ . Определите разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$ ,  $A$  и  $C$ .

**2.226.** При разомкнутом ключе (рис. 2.25) вольтметр показывает напряжение  $2,3 \text{ В}$ . Когда ключ замыкают, вольтметр и амперметр показывают соответственно напряжение  $2,1 \text{ В}$  и силу тока  $2 \text{ А}$  ( $R_v \gg R$ ). Какое внутреннее сопротивление имеет элемент?

**2.227.** Определите разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 2.26), если  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 2 \text{ В}$ ,  $r_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 1,5 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ .

**2.228.** Несколько одинаковых гальванических элементов соединены, как показано на схеме (рис. 2.27), посредством проводов, сопротивление которых ничтожно мало. Какова разность потенциалов между любыми точками соединительных проводов, например между точками  $A$  и  $B$ , точками  $A$  и  $C$ . Ответьте на этот вопрос при условии, что ЭДС элементов не равны и внутренние сопротивления прямо пропорциональны ЭДС. Как изменится ответ на первый вопрос, если элементы будут обращены друг к другу одноименными полюсами?

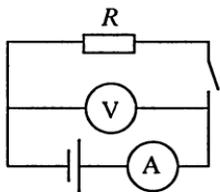


Рис. 2.25

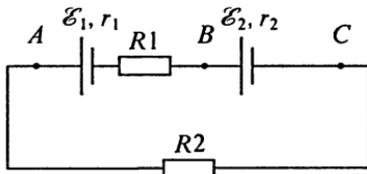


Рис. 2.26

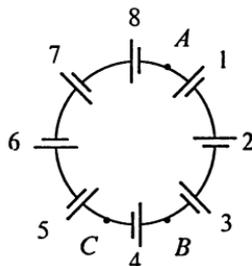


Рис. 2.27

**2.229.** При каком условии сила тока в проводнике, подключенном к двум последовательно соединенным разным гальваническим элементам, обладающим соответственно ЭДС  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  и внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$ , будет меньше силы тока в том же проводнике, подключенном к первому из этих элементов?

**2.230.** Два последовательно соединенных источника тока одинаковой ЭДС имеют различные внутренние сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ , причем  $r_2 > r_1$ . Каким должно быть сопротивление  $R$  резистора, чтобы разность потенциалов на клеммах одного из источников (какого именно?) стала равной нулю?

## Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

**2.231.** К какому следствию привело бы нарушение первого правила Кирхгофа, поясняет следующая задача. В один из узлов электрической цепи включен металлический шарик радиусом  $r = 1$  см. Допустим, что ток, втекающий в шарик ( $I = 1$  А), больше вытекающего из него тока всего на одну миллионную долю. За какое время потенциал шарика изменится на  $\Delta\varphi = 10^3$  В?

**2.232.** При включении приборов по схеме, показанной на рисунке 2.28, а, амперметр показывает силу тока  $I_1 = 2,06$  А, а вольтметр – напряжение  $U_1 = 49,6$  В. При включении тех же приборов по другой схеме (рис. 2,28, б) амперметр стал показывать силу тока  $I_2 = 1,94$  А, а вольтметр – напряжение  $U_2 = 50$  В. Определите сопротивление резистора  $R$ . Напряжение, даваемое батареей, постоянно. Внутреннее сопротивление вольтметра велико по сравнению с  $R$ .

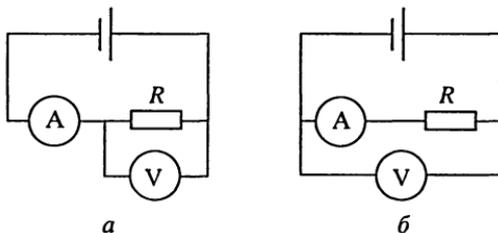


Рис. 2.28

**2.233.** Сопротивление гальванометра можно определить методом шунтирования. Для этого гальванометр включают в цепь последовательно с магазином сопротивлений (рис. 2.29). Сделав, например, сопротивление равным  $R_1 = 400$  Ом, замечают показание гальванометра. Потом гальванометр шунтируют сопротивлением  $r = 12$  Ом и, изменяя сопротивление магазина, добиваются прежнего показания гальванометра. При этом новое сопротивление  $R_2$  магазина оказалось равным 150 Ом. Вычислите по этим данным сопротивление гальванометра.

**2.234.** На рисунке 2.30 изображена схема потенциометра, при помощи которого можно менять напряжение  $U_1$ , приходящееся на прибор  $\Pi$ . Потенциометр находится под напряжением  $U$ . Полагая сопротивление прибора равным  $r$  и сопротивление потенциометра равным  $R$ , определите напряжение  $U_1$  как функцию расстояния  $x$  ползунка потенциометра от одного из его концов. Рассмотрите случаи: а)  $x = 0$ ; б)  $x = l$ ; в)  $x = l/2$ ; г)  $r \gg R$ .

**2.235.** Чтобы выяснить, где один из проводов двужильного кабеля вследствие повреждения получил соединение с землей, можно применить установку, схема которой приведена на рисунке 2.31.  $AB$  – струна, по которой можно передвигать контакт  $K$ . Определите место

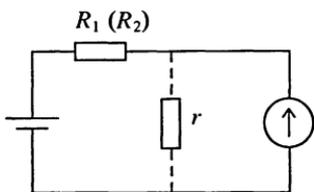


Рис. 2.29

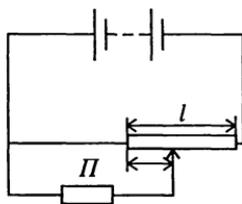


Рис. 2.30

повреждения кабеля, если гальванометр не дает отклонения, когда контакт  $K$  находится на расстоянии  $41$  см от конца  $B$  струны. Длина струны  $100$  см, длина кабеля  $7,8$  км.

**2.236.** Два гальванических элемента с электродвижущими силами  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  и внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$  соединены параллельно и дают ток во внешнюю цепь, сопротивление которой равно  $R$  (рис. 2.32). Определите: а) силу тока в элементах и во внешней цепи; б) внутреннее сопротивление и электродвижущую силу элемента, эквивалентного данной батарее (рассмотрите случаи, когда  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$  и когда  $r_1 = r_2$ ); в) силу тока в элементах при коротком замыкании батареи. Найдите условия, при которых второй элемент не будет работать. При каком значении сопротивления  $R$  токи в элементах одинаковы? Всегда ли это возможно?

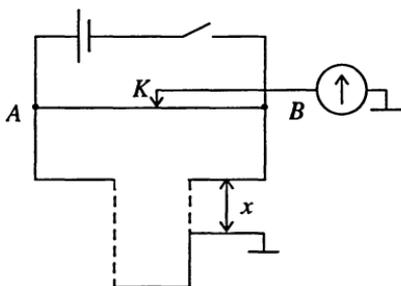


Рис. 2.31

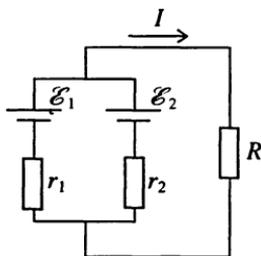


Рис. 2.32

**2.237.** Три гальванических элемента с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = 1,3$  В,  $\mathcal{E}_2 = 1,4$  В,  $\mathcal{E}_3 = 1,5$  В и с внутренними сопротивлениями по  $r = 0,3$  Ом каждый включены параллельно друг другу на резистор сопротивлением  $R = 0,6$  Ом. Определите силу тока в каждом элементе.

**2.238.** Источниками электрического тока в системах электрического оборудования автомобилей являются генератор постоянного тока и соединенный с ним параллельно аккумулятор. ЭДС генератора  $\mathcal{E}_2 = 14$  В, его внутреннее сопротивление  $r = 0,05$  Ом. ЭДС аккумулятора  $\mathcal{E}_1 = 12$  В. При какой силе тока в нагрузке аккумулятор начнет разряжаться?

**2.239.** Чему равно общее сопротивление цепи между точками  $A$  и  $B$  (рис. 2.33)?

**2.240.** Цепь составлена из девяти проводников, образующих шестиугольник с диагоналями, исходящими из одной и той же вершины (рис. 2.34), сопротивление каждого из проводников равно  $r$ . Определите сопротивление  $R$  всей цепи между точками  $A$  и  $B$ .

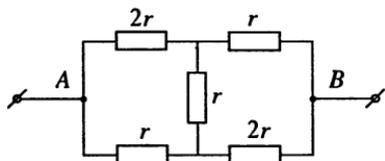


Рис. 2.33

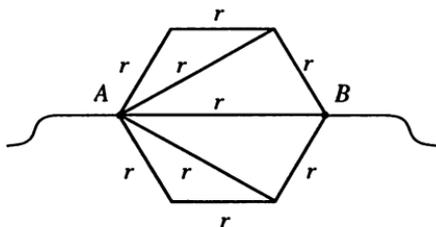


Рис. 2.34

**2.241.** Определите сопротивление между точками  $A$  и  $B$  (рис. 2.35,  $a - d$ ). Сопротивление каждого отрезка провода равно  $r$ .

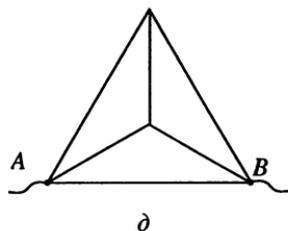
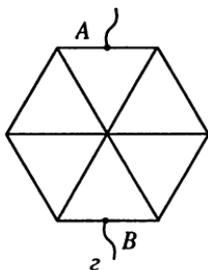
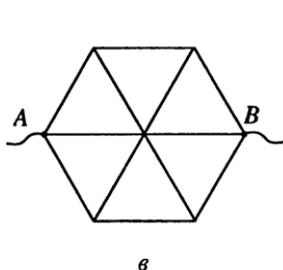
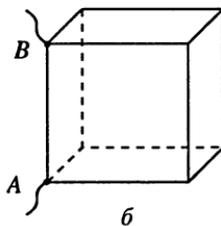
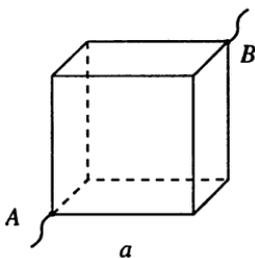


Рис. 2.35

**2.242.** Чему равно сопротивление проволочного каркаса в виде прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$  и диагональю (рис. 2.36) если:

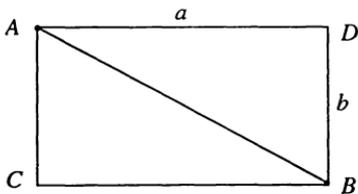


Рис. 2.36

а) ток идет от точки  $A$  к точке  $B$ ; б) ток идет от точки  $C$  к  $D$ . Сопротивление единицы длины проволоки равно  $R_l$ .

## Работа и мощность постоянного тока

**2.243.** Вполне возможно получить разность потенциалов  $10^4$  В, прочесывая шерсть расческой. Почему же такое высокое напряжение не опасно для человека, в то время как гораздо более низкое напряжение, например в цепи из большого числа элементов Вольты, может быть весьма опасным?

**2.244.** Какими специальными характеристиками должны обладать: а) провод спирали нагревательного прибора; б) провод в плавном предохранителе?

**2.245.** Толстая и тонкая проволоки из одного материала, имеющие одинаковую длину, соединены последовательно (параллельно) и подключены к источнику тока. Какая из них сильнее нагреется?

**2.246.** Почему лампа накаливания перегорает обычно при включении?

**2.247.** Изобразите графически зависимости полезной мощности; полной мощности, выделяющейся в цепи; мощности, рассеиваемой внутри источника, от сопротивления нагрузки.

**2.248.** Спираль подсоединена к сети, вследствие чего она раскалена. Как изменится накал спирали, если на часть ее попадет вода?

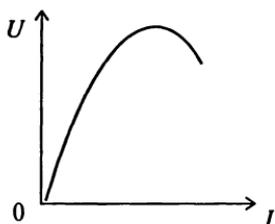


Рис. 2.37

**2.249.** Температурный коэффициент сопротивления термистора отрицателен и сильно меняется с температурой. С учетом этого обстоятельства качественно объясните форму кривой зависимости  $U(I)$  для термистора, приведенной на рисунке 2.37. При каком условии для термистора справедлив закон Ома?

**2.250.** Нарисуйте приблизительный график зависимости  $U(I)$  для электрической лампы накаливания. Какая область графика соответствует рабочим условиям? Справедлив ли здесь закон Ома?

**2.251.** Электрический ток входит в верхнюю точку сплошного медного шара и выходит из диаметрально противоположной точки. Одинаковое ли количество теплоты выделяется в разных частях шара?

**2.252.** Половину нагревательной спирали, подключенной к сети, опустили в дистиллированную воду. Как изменилась при этом мощность, выделяемая всей спиралью? частью, погруженной в воду? открытой частью?

**2.253.** Свинцовая проволока диаметром  $d$  плавится при силе тока  $I_1$ . При какой силе тока расплавится проволока диаметром  $2d$ ? Потери теплоты проволокой в обоих случаях считать пропорциональными площади поверхности проволоки.

**2.254.** Утюг рассчитан на некоторую мощность при напряжении 220 В. Как надо изменить включение нагревательной спирали, чтобы утюг нормально эксплуатировался при напряжении 110 В?

**2.255.** Имеются две электрические лампы, рассчитанные на напряжение 110 В и мощность 50 Вт и одна лампа на 110 В, 100 Вт. По какой схеме следует включить эти лампы в сеть с напряжением 220 В, чтобы все они горели полным накалом?

**2.256.** Докажите, что распределение тока в параллельно соединенных проводниках сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  соответствует минимальному количеству теплоты, выделяемому на этом участке.

**2.257.** Два чайника, каждый из которых потребляет при напряжении 220 В мощность 400 Вт, закипают при последовательном и при параллельном включении за одно и то же время. Чему равно сопротивление подводящих проводов?

**2.258.** Два проводника сопротивлением  $R = 10$  Ом каждый подключаются к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 3,0$  В сначала последовательно, а затем параллельно. В обоих случаях мощность, выделяемая каждым проводником, оказалась одинаковой. Чему равна сила тока в каждом случае?

**2.259.** Батарея состоит из  $n = 5$  последовательно соединенных элементов с ЭДС  $\mathcal{E} = 1,4$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,3$  Ом каждый. Определите: а) силу тока, при которой полезная мощность батареи равна 8 Вт; б) наибольшую полезную мощность батареи.

**2.260.** Нагреватель кипятильника состоит из четырех секций, каждая из которых имеет сопротивление  $R = 100$  Ом. Нагреватель питают от аккумуляторной батареи с ЭДС  $\mathcal{E} = 8$  В и внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом. Как нужно включить элементы нагревателя, чтобы вода в кипятильнике нагревалась быстрее? Какова при этом мощность, расходуемая аккумулятором?

**2.261.** В проводнике сопротивлением 5 Ом, подключенном к батарее элементов, сила тока равна 1 А. Сила тока короткого замыкания составляет 6 А. Определите наибольшую полезную мощность, которую может дать эта батарея.

**2.262.** Определите работу тока на участке, не содержащем источников ЭДС и имеющем сопротивление  $R = 12$  Ом, если сила тока в течение  $\tau = 5$  с равномерно увеличивается от  $I_1 = 2$  А до  $I_2 = 10$  А.

**2.263.** Определите работу электрических сил и количество теплоты, выделяемое в течение  $\tau = 1$  с: а) в проводе, если напряжение между концами провода 2 В, а сила тока в нем 1 А; б) в аккумуляторе, если сила зарядного тока равна 1 А, а ЭДС аккумулятора 1,3 В; в) в батарее аккумуляторов с ЭДС 2,6 В, если сила тока в проводнике равна 1 А, а напряжение между полюсами аккумулятора равно 2 В.

**2.264.** Когда конденсатор присоединили к батарее аккумуляторов, он зарядился и приобрел энергию 1 Дж. Какую работу совершила при этом батарея?

**2.265.** Докажите, что, когда конденсатор разряжается через резистор сопротивлением  $R$ , вся энергия, запасенная в конденсаторе, расходуется на нагревание этого резистора.

**2.266.** Конденсатор емкостью  $C = 1$  мкФ заряжен до напряжения  $U = 100$  В и подключен к резистору сопротивлением  $R = 100$  Ом. За какое время заряд конденсатора уменьшится вдвое? Насколько уменьшится при этом энергия конденсатора? Какая энергия выделится в резисторе?

**2.267.** Конденсатор емкостью  $C = 5$  мкФ подключили к источнику постоянной ЭДС  $\mathcal{E} = 200$  В (рис. 2.38). Затем переключатель  $S$  перевели с контакта 2 на контакт 1. Определите количество теплоты, выделившееся на резисторе  $R_1$  ( $R_1 = 500$  Ом), если  $R_2 = 330$  Ом.

**2.268.** Каково внутреннее сопротивление одного аккумулятора, если при смешанном соединении аккумуляторов в две группы по четыре аккумулятора в каждой, на резисторе сопротивлением  $R = 3$  Ом выделяется такая же мощность, как и в случае последовательного соединения аккумуляторов, замкнутых на тот же резистор?

**2.269.** Смешанная батарея из большого числа ( $N = 300$ ) одинаковых элементов, каждый с внутренним сопротивлением  $r = 0,3$  Ом, подключена к резистору сопротивлением  $R = 10$  Ом. Определите число параллельных групп, содержащих одинаковое число последовательно соединенных элементов, при котором на этом резисторе будет выделяться максимальная мощность.

**2.270.** Гальванический элемент с внутренним сопротивлением  $r$  замыкают поочередно двумя проводниками сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$  каждый. В каком соотношении должны находиться сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $r$ , чтобы: а) в проводниках  $R_1$  и  $R_2$  за определенное время выделилось одинаковое количество теплоты; б) в проводнике меньшего сопротивления выделилось меньшее количество теплоты?

**2.271.** В схеме (рис. 2.39) сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  равны соответственно  $R_1 = 20$  Ом и  $R_2 = 30$  Ом. При каком значении сопротивления  $R_3$  выделяемая на резисторе  $R_3$  мощность практически не будет зависеть от малых изменений этого сопротивления? Напряжение между точками  $A$  и  $B$  предполагается при этом постоянным.

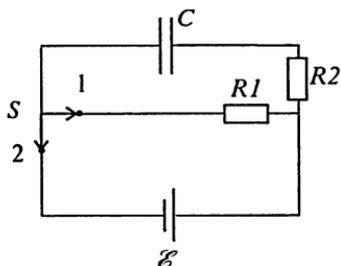


Рис. 2.38

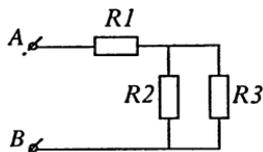


Рис. 2.39

**2.272.** В схеме (рис. 2.40) заданы сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$ , а также ЭДС  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  источников. Внутренние сопротивления источников пренебрежимо малы. При каком значении сопротивления резистора  $R$  выделяемая на нем мощность будет максимальной? Чему она равна?

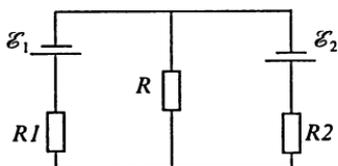


Рис. 2.40

**2.273.** Свинцовая проволока диаметром  $d = 1$  мм в плавком предохранителе расплавляется при силе тока не меньшей  $I_1 = 8$  А. При какой силе тока  $I_2$  расплавится проволока диаметром  $d_2 = 2$  мм? Считать проволоку достаточно длинной (для того, чтобы можно было пренебречь охлаждением ее у зажимов). Считать, что количество теплоты, выделяемое проволокой в окружающее пространство, прямо пропорционально площади поверхности проволоки.

**2.274.** Электрическая пустотная лампа мощностью  $P_1 = 50$  Вт, предназначенная для напряжения  $U_1 = 120$  В, имеет волосок диаметром поперечного сечения  $d_1 = 0,44$  мм и длиной  $l_1 = 612$  мм. Какой диаметр  $d_2$  и длину  $l_2$  должен иметь волосок лампы мощностью  $P_2 = 15$  Вт, предназначенной для напряжения  $U_2 = 220$  В? При расчете не учитывать теплоту, выделяемую на крючках, поддерживающих волосок; считать температуру волоска в обоих случаях одинаковой; волосок рассматривать как круглый цилиндр.

**2.275.** Для накала нити одного из типов электронной лампы нужно напряжение 3,8 В при силе тока 0,65 А. Вследствие испарения нити диаметр ее уменьшился на 10%. Какое потребуется напряжение, чтобы поддержать температуру накала прежней? Какова при этом сила тока?

## 2.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

### Электрический ток в растворах электролитов

**2.276.** Двигаются ли ионы в растворах электролитов по линиям напряженности электрического поля? Что имеют в виду, когда говорят, что линии тока в растворах электролитов совпадают с линиями напряженности поля?

**2.277.** Запаянную пробирку с раствором серной кислоты приводят в быстрое вращение так, как показано на рисунке 2.41. После резкого торможения впаянные по ее концам электроды сразу замыкают на гальванометр, дающий кратковременный отброс. Каково направление тока?

**2.278.** Почему все разноименные ионы в растворе электролита под действием взаимного притяжения не соединяются в нейтральные молекулы? Что поддерживает ионизацию внутри раствора?

**2.279.** На рисунке 2.42 приведена зависимость удельной проводимости раствора серной кислоты в воде от массовой доли растворенного вещества при неизменной температуре. Дайте качественное объяснение графика.

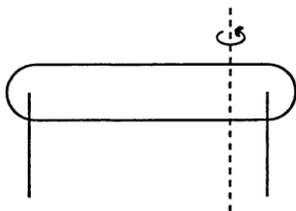


Рис. 2.41

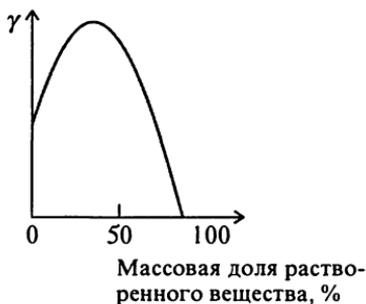


Рис. 2.42

**2.280.** Для того, чтобы определить, какой из полюсов неизвестного источника тока положительный, а какой отрицательный, можно опустить провода, соединенные с полюсами, в стакан с водой и посмотреть, возле какого из проводов выделяется больше газа. Как по этим данным определить, какой из полюсов отрицательный?

**2.281.** Если в водный раствор серной кислоты опустить цинковую и медную пластины, между ними возникнет разность потенциалов (элемент Вольты). Не противоречит ли этот результат утверждению о том, что все точки проводника (раствора и металла) при отсутствии тока должны иметь одинаковый потенциал?

**2.282.** Нарисуйте графики распределения потенциала внутри элемента Вольты для случаев, когда он разомкнут и замкнут на нагрузку. В чем причина возникновения скачков потенциала?

**2.283.** Если элемент Вольты замкнуть на резистор с амперметром, легко заметить, что показания амперметра не остаются постоянными, а постепенно уменьшаются. Объясните явление.

**2.284.** Две электролитические ванны соединены последовательно. В первой ванне выделился цинк массой  $m_1 = 3,9$  г, во второй за то же время – железо массой  $m_2 = 2,24$  г. Цинк двухвалентен. Какова валентность железа?

**2.285.** Электролитическая ванна с раствором медного купороса присоединена к батарее аккумуляторов с электродвижущей силой 4 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом. Определите: а) массу меди, выделившейся за 10 мин, если ЭДС поляризации равна 1,5 В и сопротивление раствора 0,5 Ом; б) отношение заряда иона меди к его массе. Медь двухвалентна.

**2.286.** При электролизе раствора соли  $\text{AgNO}_3$  в течение 1 ч выделилось 9,4 г серебра. Определите ЭДС поляризации, если напряжение на зажимах ванны 4,2 В, а ее сопротивление 1,5 Ом.

### Электрический ток в вакууме и газах

**2.287.** Плотность тока насыщения двухэлектродной вакуумной лампы при температуре катода  $T_1$  равна  $j_1$ , а при температуре  $T_2 - j_2$ . Можно ли по этим данным определить, из какого металла сделан катод?

**2.288.** На рисунке 2.43, а показана вольт-амперная характеристика двухэлектродной лампы, а на рисунке 2.43, б – зависимость силы тока между пластинами плоского конденсатора от напряжения при несамостоятельном газовом разряде. Сравните эти графики. В чем причина различий? Как изменится график (см. рис. 2.43, а), если увеличить температуру катода? Как изменится вольт-амперная характеристика (см. рис. 2.43, б), если: а) раздвинуть пластины конденсатора, не меняя мощности ионизатора; б) не изменяя расстояния между пластинами, уменьшить мощность ионизатора?

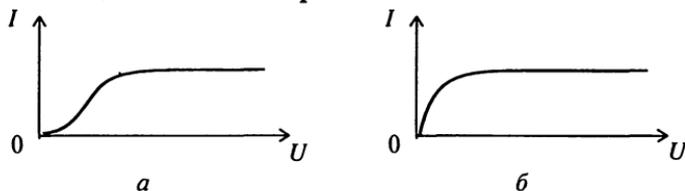


Рис. 2.43

**2.289.** На рисунке 2.44 показано распределение потенциала при тлеющем разряде в зависимости от расстояния до катода. В какой об-

ласти между электродами напряженность поля наибольшая и в какой равна нулю?

**2.290.** На рисунке 2.45 показана зависимость силы тока при дуговом разряде от напряжения между электродами. Как меняется сопротивление газового промежутка при уменьшении разности потенциалов? В чем причина этого изменения?

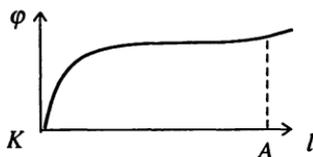


Рис. 2.44

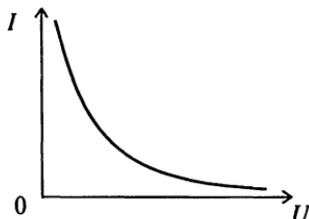


Рис. 2.45

**2.291.** Почему катодные лучи представляют собой прямолинейный пучок независимо от того, находится анод на пути пучка или смещен в сторону?

**2.292.** Определите силу тока насыщения в электронной лампе с вольфрамовым катодом при таких данных: длина нити накала 3 см, диаметр нити 0,1 мм, абсолютная температура нити накала 2700 К. Эмиссионная постоянная для вольфрама равна  $60 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ .

**2.293.** Эмиссионная постоянная для чистого вольфрама равна  $60 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ , для торированного вольфрама  $3 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ . Определите для двухэлектродной лампы, имеющей катод из таких металлов, отношение плотности токов насыщения при температуре 1800 К.

**2.294.** Для определения работы выхода электрона из вольфрама измерили силы токов насыщения  $I_1$  и  $I_2$  двухэлектродной лампы с вольфрамовым катодом при температурах катода  $t_1 = 174^\circ\text{С}$  и  $t_2 = 1727^\circ\text{С}$ . При этом оказалось, что  $I_1 = 4/3 I_2$ . Пользуясь этими данными, определите работу выхода электронов из вольфрама.

**2.295.** В сосуд с газом поместили такой радиоактивный элемент, что ежесекундно в  $1 \text{ см}^3$  газа ионизируется  $10^{10}$  молекул. В результате рекомбинации в сосуде установилось равновесие, причем в  $1 \text{ см}^3$  находится  $10^8$  положительных ионов. Определите коэффициент рекомбинации. Во сколько раз изменится электропроводность воздуха через 1 с после удаления радиоактивного препарата?

**2.296.** Число пар ионов, образующихся в  $1 \text{ см}^3$  воздуха за 1 с, принимают равным над океанами вдали от суши в среднем 1 (действие космического излучения), над сушей в среднем 8 (действие космических лучей и радиоактивных веществ в воздухе и в почве). Воздух над океаном можно считать свободным от пыли, при этом

число пар ионов, рекомбинирующих за 1 с в 1 см<sup>3</sup>, равно  $\Delta n = \alpha n^2$ , где  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициент рекомбинации,  $n$  – концентрация ионов. Воздух над сушей загрязнен пылью. В таком случае число пар ионов, рекомбинирующих в 1 с, можно считать пропорциональным  $n$ :  $\Delta n = \beta n$ , где  $\beta = 0,01 \text{ с}^{-1}$ . Вычислите концентрацию ионов над океаном и над сушей.

**2.297.** При ионизации воздуха рентгеновскими лучами в 1 см<sup>3</sup> образуется  $\Delta n_0 = 10^6$  пар ионов. Через сколько времени после прекращения действия ионизатора число пар ионов уменьшится до  $\Delta n = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , если: а) воздух чистый ( $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\Delta n = \alpha n^2$ ); б) воздух загрязнен пылью ( $\beta = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Delta n = \beta n$ ). Влиянием других ионизаторов пренебречь.

**2.298.** Концентрация ионов, обуславливающих проводимость атмосферного воздуха, в среднем равна  $n = 700 \text{ см}^{-3}$ . Среднее значение напряженности электрического поля вблизи поверхности Земли равно  $E = 130 \text{ В/м}$ . Вычислите плотность тока проводимости в атмосфере, приняв подвижность положительных ионов  $\mu_+ = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , отрицательных  $\mu_- = 1,91 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

**2.299.** Воздух между пластинами конденсатора ионизируется. Сила тока насыщения между пластинами равна  $I = 2 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ . Площадь пластин  $S = 100 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $d = 0,5 \text{ см}$ . Определите число пар ионов, образующихся за 1 с в 1 см<sup>3</sup>.

**2.300.** В газоразрядной трубке с плоскими электродами ( $S = 10 \text{ см}^2$ ) расположенными друг от друга на расстоянии  $l = 10 \text{ см}$ , сила тока насыщения равна  $I = 10^{-6} \text{ А}$ . Ионы в трубке возникают под действием постороннего ионизатора (несамостоятельный разряд). Сколько элементарных зарядов того и другого знака создается каждую секунду в 1 см<sup>3</sup>, если считать ионы однозарядными?

**2.301.** Воздух между плоскими электродами ( $S = 100 \text{ см}^2$ ), находящимися на расстоянии  $l = 5 \text{ см}$  друг от друга, ионизируется рентгеновскими лучами; при этом сила тока насыщения  $I = 10^{-7} \text{ А}$ . Определите число пар ионов, создаваемых ионизатором в 1 см<sup>3</sup> в 1 с, а также концентрацию этих пар  $\Delta n_0$  в установившемся состоянии. Коэффициент рекомбинации для воздуха  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

**2.302.** В атмосферном воздухе у поверхности Земли из-за радиоактивности почвы и ионизации космическими лучами в среднем в 1 см<sup>3</sup> образуется  $n = 5$  ионов. Благодаря этой естественной ионизации в плоском воздушном конденсаторе с площадью каждой обкладки  $S = 100 \text{ см}^2$  и расстоянии между обкладками  $d = 5 \text{ см}$  возникает ток. Определите силу тока насыщения.

**2.303.** Определите время разрядки конденсатора (см. задачу 2.302), если первоначально он был заряжен до разности потенциалов  $U = 300 \text{ В}$ .

## 2.7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### Магнитное поле постоянного тока

**2.304.** Сравните силы кулоновского и магнитного взаимодействий двух зарядов, движущихся с одинаковыми скоростями параллельно друг другу. Почему при взаимодействии токов сила кулоновского взаимодействия между металлическими проводами пренебрежимо мала?

**2.305.** Вдоль длинного прямолинейного магнита расположен гибкий свободный проводник. Какое он займет положение, если по нему пропустить ток?

**2.306.** Прямолинейный провод проходит по оси кругового витка. Силы токов в проводе и витке соответственно равны  $I_1$  и  $I_2$ . С какой силой взаимодействуют провод и виток?

**2.307.** Выберем в магнитном поле некоторую произвольную замкнутую поверхность. Каков поток вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через эту поверхность? Решите задачу, заменив магнитное поле электростатическим.

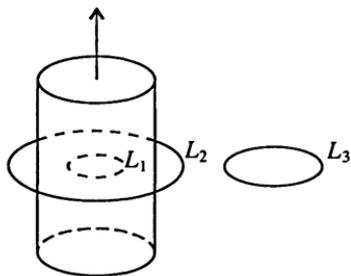


Рис. 2.46

**3.308.** Постоянный ток равномерно распределен по сечению цилиндрического проводника. Плотность тока равна  $j$ . Какова циркуляция вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  по трем контурам  $L_1, L_2, L_3$ , представляющим собой окружности, расположенные в плоскости, перпендикулярной проводнику (рис. 2.46)?

**2.309.** Как изменится индукция магнитного поля внутри и вне медной трубы при увеличении силы тока в трубе в 2 раза?

**2.310.** Найдите направление и модуль силы, действующей на проводник с током в однородном магнитном поле (рис. 2.47,  $a - d$ ). Устойчиво ли положение витка (рис. 2.47,  $e, \delta$ )? Как направлены силы, действующие на отдельные элементы витка?

**2.311.** Круговой виток с током находится в магнитном поле (рис. 2.48). Как направлены силы, действующие на отдельные элементы витка? Какая сила действует на весь виток? Можно ли подобрать условия эксперимента таким образом, чтобы виток неподвижно висел в этом поле?

**2.312.** Индукция  $d\vec{B}$  магнитного поля, создаваемого элементом тока  $Ia\vec{l}$  на расстоянии  $r$  от этого элемента, определяется законом Био – Савара – Лапласа. Покажите, что  $d\vec{B}$  равно векторной сумме индукций  $\vec{B}_j$ , создаваемых каждым электроном, участвующим в токе.

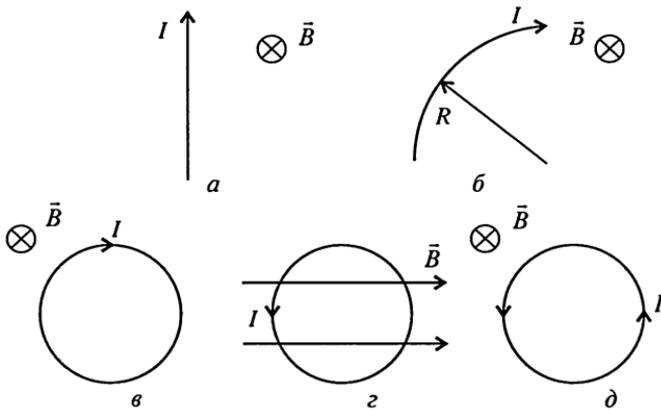


Рис. 2.47

**2.313.** Из куска изолированной проволоки сделан круговой виток радиусом  $R$  и подключен к источнику тока с постоянной ЭДС  $\mathcal{E}$ . Как изменится напряженность магнитного поля в центре круга, если из того же куска проволоки сделать два прилегающих друг к другу витка радиусом  $R/2$  с общим центром?

**2.314.** В прямолинейном проводнике сила тока  $I = 12$  А. Определите напряженность магнитного поля в точке, равноудаленной от концов проводника длиной  $l$  и находящейся на расстоянии  $a = 8$  см от оси проводника. Рассмотрите случаи: а)  $l = 20$  см; б)  $l \gg a$ .

**2.315.** В круговом витке радиусом  $R = 100$  мм из тонкого провода сила тока  $I = 1$  А. Чему равна магнитная индукция: а) в центре витка; б) на оси витка в точке, находящейся от его центра на расстоянии  $x = 100$  мм?

**2.316.** Источник ЭДС присоединен к двум противоположным вершинам проволочного плоского контура, имеющего форму квадрата. Какова напряженность магнитного поля  $H$ , создаваемого токами, текущими по сторонам контура, в центре квадрата? Поле подводящих проводов не учитывать.

**2.317.** Определите напряженность магнитного поля  $H$  в центре равностороннего треугольника со стороной  $a$ , если сила тока в треугольнике равна  $I$ .

**2.318.** Какова напряженность магнитного поля  $H$  в центре равностороннего треугольника из однородной проволоки, если источник ЭДС подключен к двум вершинам треугольника? Поле подводящих проводов не учитывать.

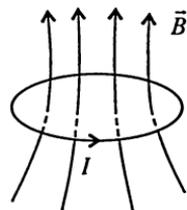


Рис. 2.48

**2.319.** К противоположным концам диаметра  $AB$  проволочного контура в виде окружности радиусом  $R$  (рис. 2.49) присоединен источник ЭДС. Какова напряженность магнитного поля  $H$  в произвольной точке  $C$  диаметра? Поле подводящих проводов не учитывать.

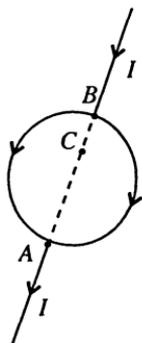


Рис. 2.49

**2.320.** Найдите напряженность магнитного поля на оси соленоида в точке  $A$ , из которой диаметры концов соленоида видны под углом  $2\alpha$  и  $2\beta$  (рис. 2.50). Соленоид состоит из  $N$  витков, равномерно намотанных на каркас длиной  $l$ . Сила тока в обмотке равна  $I$ .

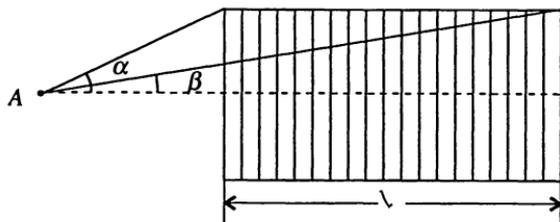


Рис. 2.50

**2.321.** Определите напряженность магнитного поля  $H$ , если поле создается током, текущим: а) по бесконечному прямому проводу (на расстоянии  $R$  от оси провода); б) по тороидальной катушке с числом витков  $N$  (на расстоянии от оси тора, равном среднему радиусу  $r$  катушки); в) по бесконечно длинной катушке – соленоиду (число витков на единицу длины  $n$ ). Силу тока во всех проводниках считать равной  $I$ .

**2.322.** Медный провод диаметром  $d = 2,5$  мм без изоляции может выдержать без перегрева силу тока  $I = 50$  А. Какова магнитная индукция  $B$  у поверхности провода при таком токе?

**2.323.** Прямой бесконечный провод имеет круговую петлю радиусом  $R = 8$  см (рис. 2.51). Определите силу тока в проводе, если известно, что напряженность магнитного поля в центре петли  $H = 100$  А/м.

**2.324.** Топограф пользовался компасом под линией электропередачи, сила тока в которой равна 100 А. Сильно ли отразится это на показаниях компаса, если расстояние от него до линии электропередачи 6 м, а горизонтальная проекция напряженности земного магнитного поля равна 14 А/м?

**2.325.** Четыре цилиндрических проводника расположены параллельно друг другу, причем центры их поперечных сечений образуют квадрат со стороной  $a = 20$  см. Сила тока  $I$  в каждом проводе равна

20 А; направление показано на рисунке 2.52. Определите модуль и направление вектора  $\vec{B}$  в центре квадрата.

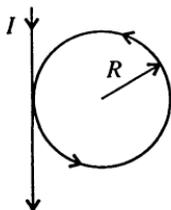


Рис. 2.51



Рис. 2.52

**2.326.** Сила тока в цилиндрическом проводе радиусом  $R = 2$  см и длиной  $l = 3$  м равна  $I = 50$  А. Определите: а) напряженность магнитного поля в точках, отстоящих от оси провода на расстояниях  $r_1 = 0,5$  см и  $r_2 = 5$  см; б) магнитный поток, пронизывающий одну из половин осевого сечения провода.

**2.327.** Ток идет по полой тонкостенной трубе радиусом  $R = 5$  см и возвращается по сплошному проводнику радиусом  $r = 1$  мм, расположенному по оси трубы. Длина трубы  $l = 20$  м. Сила тока  $I = 20$  А. Пространство между сплошным проводом и трубой заполнено диэлектриком. Определите магнитный поток, пронизывающий диэлектрик.

**2.328.** В медной трубе, внутренний и внешний радиусы которой равны соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , сила тока равна  $I_0$ . Предполагая, что плотность тока по сечению трубы одинакова, определите зависимость напряженности магнитного поля от расстояния до оси трубы для точек внутри трубы и вне трубы. Постройте график  $H(r)$ .

**3.329.** Медный провод, площадь поперечного сечения которого  $S = 2$  мм<sup>2</sup>, согнут в виде трех сторон квадрата и может вращаться относительно горизонтальной оси. Провод находится в однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально. При силе тока  $I = 10$  А он отклоняется на угол  $\alpha = 15^\circ$ . Определите индукцию магнитного поля.

**2.330.** По медному стержню массой  $m = 0,14$  кг, лежащему поперек двух рельсов, расположенных друг от друга на расстоянии  $l = 0,3$  м, проходит ток. Коэффициент трения скольжения стержня по рельсам  $\mu = 0,6$ . Система помещена в магнитное поле с индукцией, перпендикулярной плоскости, в которой расположены рельсы. Определите минимальное значение индукции магнитного поля, при котором проводник начнет скользить по рельсам, если сила тока  $I = 50$  А.

**2.331.** Внутри длинного круглого металлического цилиндра, вдоль которого идет ток, имеется цилиндрическая полость, ось которой отстоит от оси цилиндра на расстояние  $d$  (рис. 2.53). Опреде-

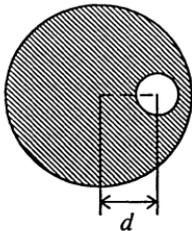


Рис. 2.53

лите напряженность магнитного поля внутри полосты, если плотность тока равна  $j$ .

**2.332.** Два длинных параллельных провода с пренебрежимо малым сопротивлением замкнуты с одного конца на проводник сопротивлением  $R$ , а с другого конца подключены к источнику постоянного напряжения. Расстояние между осями проводов в  $\eta = 20$  раз больше радиуса сечения каждого провода. При каком значении сопротивления  $R$  результирующая сила взаимодействия проводов обратится в нуль?

**2.333.** В кольце радиусом  $R = 4,37$  см, расположенном горизонтально, сила тока  $I = 5$  А. Кольцо, находясь в магнитном поле, меняющемся с высотой, остается неподвижным. Определите градиент индукции магнитного поля в месте расположения кольца. Масса кольца  $m = 10$  г.

### Движение заряженных частиц в магнитном поле

**2.334.** Электрон влетает со скоростью  $\vec{v}$  в однородное магнитное поле. Какие траектории движения заряда возможны? Запишите уравнение для каждого случая.

**2.335.** Протон и электрон, имеющие одинаковую скорость, попадают в однородное магнитное поле, индукция которого  $\vec{B}$  перпендикулярна скорости зарядов. Как будут отличаться траектории заряженных частиц?

**2.336.** Два заряда движутся во взаимно перпендикулярных направлениях с одинаковыми по модулю скоростями. Как направлена сила, действующая на каждый заряд в данный момент времени? Не противоречит ли ответ привычным законам ньютоновской механики?

**2.337.** Какова траектория заряженной частицы, попадающей в неоднородное магнитное поле и движущейся в область сильного поля?

**2.338.** Траектория пучка электронов, движущихся в вакууме в магнитном поле с напряженностью  $5,56 \cdot 10^3$  А/м, – окружность радиусом 3 см. Определите скорость и энергию электронов, период их обращения и момент импульса.

**2.339.** Два иона, имеющие одинаковый заряд и прошедшие одинаковую ускоряющую разность потенциалов, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион движется по дуге окружности радиусом 5 см, второй – по дуге окружности радиусом 2,5 см. Определите отношение масс ионов.

**2.340.** Покажите, что время движения заряженной частицы в циклотроне не зависит от радиуса траектории, по которой движется частица.

2.341. Определите промежуток времени, в течение которого протон в циклотроне достигает энергии  $W$ . Начальная скорость протона мала. В моменты перехода протона из одного дуанта в другой напряжение между ними равно  $U$ . Индукция магнитного поля  $B$ . Зависимость массы протона от скорости пренебречь.

2.342. Линии напряженности однородно электрического поля ( $E = 300$  В/м) и линии индукции магнитного поля ( $B = 10^{-4}$  Тл) взаимно перпендикулярны. Какой должна быть скорость электрона по модулю и направлению, чтобы его движение в этих полях было прямолинейным и равномерным?

2.343. Протон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 500$  кВ, пролетает однородное магнитное поле с индукцией, линии которой перпендикулярны чертежу (рис. 2.54);  $B = 0,51$  Тл. Толщина области с полем  $d = 10$  см. Найдите угол отклонения протона от первоначального направления движения.

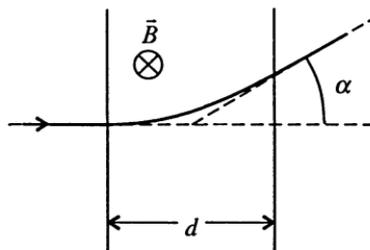


Рис. 2.54

2.344. Покажите, что сила Ампера, действующая на элемент неподвижного провода с током в магнитном поле, есть векторная сумма сил Лоренца, действующих на каждый электрон, участвующий в токе. Каков механизм передачи действия этой силы от электронов к решетке проводника?

2.345. Электрон движется в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях (начальная скорость  $v_0 = 0$ ). Запишите уравнение его траектории.

2.346. Электрон, обладающий скоростью  $\vec{v}$ , движется в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , перпендикулярной к его скорости. Найдите момент импульса  $L$  и магнитный момент  $\rho_m$  электрона.

2.347. Электрон в атоме водорода обращается вокруг ядра по круговой орбите с угловой скоростью  $\omega$ . Найдите изменение  $\Delta\omega$  угловой скорости электрона при помещении атома в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , перпендикулярной плоскости орбиты (рис. 2.55, а, б). Как направлен в обоих случаях вектор  $\Delta\vec{p}$ , характеризующий изменение магнитного момента электрона, обусловленное изменением его угловой скорости  $\Delta\omega$ ?

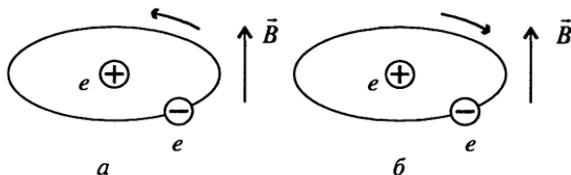


Рис. 2.55

**2.348.** Серпуховской ускоритель протонов дает частицы с энергией  $W = 76$  ГэВ. Если отвлечься от наличия ускоряющих промежутков, можно считать, что ускоренные протоны движутся по окружности радиусом  $R = 236$  м и удерживаются на ней магнитным полем, индукция которого перпендикулярна плоскости орбиты. Определите модуль индукции этого магнитного поля.

### Индуктивность. Энергия магнитного поля. Магнетики

**2.349.** Можно ли определить индуктивность достаточно длинной катушки, если пропустить через нее постоянный ток?

**2.350.** Имеется гибкая длинная прямая катушка (соленоид). Изменится ли индуктивность катушки, если ее свернуть в кольцо (тороид)?

**2.351.** Какой магнитный поток создает катушка из 1000 витков, имеющая индуктивность 5 Гн, если сила тока в катушке 0,6 А?

**2.352.** Какой длины надо взять тонкий провод, чтобы изготовить соленоид длиной  $l = 100$  см с индуктивностью  $L = 1$  мГн, если диаметр сечения соленоида значительно меньше его длины?

**2.353.** Найдите индуктивность: а) тороидальной катушки; б) единицы длины коаксиальной линии, если радиус внутреннего проводника  $R_1$ , наружного  $R_2$ ; в) единицы длины бесконечного провода.

**2.354.** Двухпроводная линия состоит из двух медных проводов радиусом  $r = 1$  мм. Расстояние между осями проводов  $d = 5$  см. Определите индуктивность единицы длины такой линии.

**2.355.** На длинный цилиндр намотаны вплотную две отмотки  $1, 1'$  и  $2, 2'$  (рис. 2.56). Индуктивности обмоток одинаковы:  $L_1 = L_2 = 0,05$  Гн. Какой будет индуктивность системы, если: а) концы  $1'$  и  $2'$  соединить, а в цепь включить концы  $1$  и  $2$ ; б) концы  $1$  и  $2'$  соединить, а в цепь включить концы  $1'$  и  $2$ ; в) концы  $1'$  и  $2'$  соединить и обе пары включить в цепь?

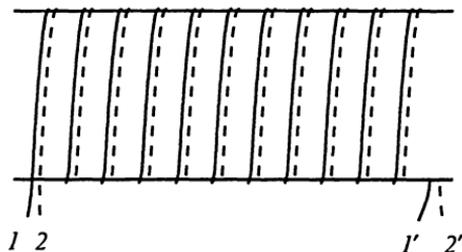


Рис. 2.56

**2.356.** Две одинаковые катушки, каждая индуктивностью  $L$ , соединяют: а) последовательно; б) параллельно. Считая взаимную индук-

тивность катушек пренебрежимо малой, найдите индуктивность системы в обоих случаях.

**2.357.** На один сердечник намотаны две катушки, индуктивности которых соответственно равны  $L_1 = 75$  Гн и  $L_2 = 0,7$  Гн. Если катушки соединить так, что токи в них пойдут в противоположных направлениях, то индуктивность всей системы станет равной нулю. Найдите коэффициент взаимной индукции системы.

**2.358.\*** На железный сердечник, имеющий форму тора квадратного сечения (сторона квадрата  $a = 4$  см), намотана равномерно в один слой проволока. Средний диаметр тора  $D = 40$  см. Число витков проволоки  $N = 500$ . Найдите магнитный поток через сечение сердечника, если сила тока в проволоке равна  $I = 1$  А. Магнитная проницаемость железа  $\mu = 400$ .

**2.359.\*** Если железный тор (см. задачу 2.358) разрезать в одном месте так, чтобы образовался воздушный зазор шириной  $l = 1$  мм, то чему будет равен магнитный поток? Рассеянием магнитного потока в зазоре пренебречь.

**2.360.\*** Железный сердечник имеет размеры, указанные в задаче 2.358. Если ширина воздушного зазора равна  $l_1 = 1$  мм, то при некоторой силе тока магнитный поток равен  $\Phi_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  Вб. Когда ширину воздушного зазора увеличили до  $l_2 = 2$  мм, то при той же силе тока магнитный поток индукции оказался равным  $\Phi_2 = 2,5 \cdot 10^{-5}$  Вб. Предполагая, что в обоих случаях рассеянием магнитного потока можно пренебречь, определите магнитную проницаемость железа.

**2.361.\*** Средняя длина окружности железного кольца  $l = 61$  см. В нем сделана прорезь шириной  $l_1 = 1$  см. На кольце имеется обмотка с  $N = 1000$  витками. При силе тока в обмотке  $I = 1,5$  А индукция поля в прорези равна  $B = 0,18$  Тл. Определите магнитную проницаемость железа при этих условиях, приняв, что площадь сечения магнитного потока в прорези в  $k = 1,1$  раза больше площади сечения кольца.

**2.362.\*** На двух одинаковых железных кольцах (диаметр кольца  $d = 10$  см) намотана обмотка из 100 витков. В одном из колец имеется поперечная прорезь шириной  $l = 1$  мм. Сила тока в обмотке сплошного кольца равна  $I_1 = 2$  А. Какой должна быть сила тока  $I_2$  в обмотке второго кольца, чтобы в нем была создана та же индукция? Площади сечения потока индукции в воздухе и в железе считать одинаковыми.

**2.363.** Где в тороиде плотность энергии больше: ближе к внутреннему радиусу или к внешнему?

**2.364.** Определите энергию магнитного поля в железном сердечнике объемом  $400$  см<sup>3</sup>, если индукция равна  $1,2$  Тл.

---

\* При решении задач 2.358 – 2.362 воспользуйтесь рисунком из приложения 7.

2.365. При некоторой силе тока плотность энергии магнитного поля соленоида (без сердечника) равна  $0,2 \text{ Дж/м}^3$ . Во сколько раз увеличится плотность энергии поля при той же силе тока, если в соленоид вставить железный сердечник?

### Электромагнитная индукция

2.366. Магнит удаляют от металлического кольца так, как показано на рисунке 2.57. Определите направление индукционного тока в кольце.

2.367. Медный лист помещен в магнитное поле. Если мы попытаемся вытолкнуть его из поля, то почувствуем сопротивление. Объясните его происхождение.

2.368. В катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигают магнит, и стрелка гальванометра дает отброс. Затем гальванометр заменяют реостатом, сопротивление которого равно сопротивлению гальванометра, и снова с той же скоростью вдвигают магнит. Одинаковые ли индукционные токи возникают в этих случаях?

2.369. Если вращать медный диск вблизи магнитной стрелки, способной вращаться в плоскости, параллельной плоскости диска, стрелка начинает вращаться в ту же сторону, что и диск. Почему?

2.370. Почему при колебаниях металлического маятника между полюсами электромагнита маятник сильно тормозится?

2.371. В магнитном поле движется проводник со скоростью  $\vec{v}$  (рис. 2.58). Определите знаки зарядов, возникающих на концах проводника.

2.372. На рисунке 2.59 показано направление индукционного тока в проводнике, который движется перпендикулярно чертежу к читателю. Как направлены линии индукции магнитного поля?

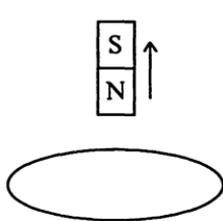


Рис. 2.57

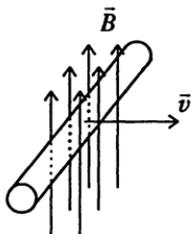


Рис. 2.58

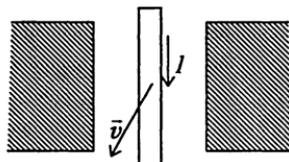


Рис. 2.59

2.373. Плоские контуры из тонких проводов (рис. 2.60,  $a - z$ ) находятся в однородном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости рисунка и направлен за плоскость. Индукцию начали уменьшать. Как будет направлен возникающий индукционный ток в этих контурах?

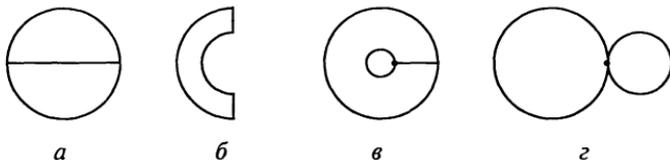


Рис. 2.60

**2.374.** Почему сердечники трансформаторов собирают из тонких изолированных друг от друга листов стали, а не делают их сплошными?

**2.375.** Круговой виток из сверхпроводящего материала вносится в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  так, что нормаль к плоскости витка составляет прямой угол с направлением вектора магнитной индукции. Определите направление индукционного тока в витке. Как направлен магнитный момент этого тока?

**2.376.** В короткозамкнутую катушку один раз быстро, другой – медленно вдвигают магнит. Одинаковый ли заряд индуцируется в катушке в первый и во второй раз? Одинаковую ли работу против электромагнитных сил производит рука,двигающая магнит? За счет какой энергии производится нагрев проводов при протекании по ним индукционного тока?

**2.377.** По катушке с железным сердечником течет индукционный ток. Как изменится энергия магнитного поля катушки, если из нее вынуть сердечник? За счет какого источника изменяется энергия магнитного поля?

**2.378.** На сердечник электромагнита надето легкое проводящее кольцо  $A$ , радиус которого больше радиуса сердечника (рис. 2.61). Как будет направлен индукционный ток, возникающий в кольце при замыкании (или размыкании) цепи электромагнита? Как направлен магнитный момент индукционного тока? Как будет вести себя кольцо при замыкании ключа?

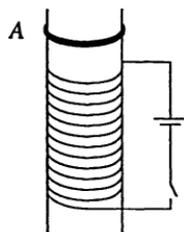


Рис. 2.61

**2.379.** Магнит падает вниз по длинной медной трубе. Будет ли он падать с ускорением свободного падения, если сопротивление воздуха пренебрежимо мало?

**2.380.** Два параллельных достаточно длинных провода находятся на расстоянии  $h$  друг от друга. В них поддерживаются одинаковые токи противоположного направления. Какая работа на единицу длины проводов совершается магнитным полем при удалении проводов на расстояние  $l$ ? Как изменяется при этом магнитная энергия единицы длины этих проводов? (Дайте качественный ответ на этот вопрос.) За счет каких источников энергии совершается работа и изменяется энергия?

**2.381.** Изобразите качественно, как будет меняться с течением времени сила тока в цепи (рис. 2.62) после замыкания ключа? Зависит ли

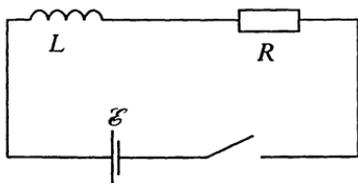


Рис. 2.62

от значения ЭДС время, необходимое для того, чтобы сила тока в цепи достигла половины установившегося значения?

**2.382.** Круглый виток радиусом  $R$ , сделанный из медной проволоки, площадь поперечного сечения которого  $S$ , находится в однородном магнитном поле, напряженность которого за неко-

торое время меняется от  $H$  до нуля. Сколько электронов пройдет через поперечное сечение проволоки за время существования электрического тока?

**2.383.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл вращается квадратная рамка со стороной  $a = 20$  см, состоящая из  $N = 100$  витков медного провода с площадью поперечного сечения  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. Максимальное значение силы индукционного тока в рамке  $I_m = 2$  А. Определите частоту вращения рамки.

**2.384.** В переменном магнитном поле находится короткозамкнутая катушка сопротивлением  $R = 10$  Ом и индуктивностью  $L = 0,02$  Гн. При изменении магнитного потока, пронизывающего катушку, на  $\Delta\Phi = 10^{-3}$  Вб сила тока в катушке изменяется на  $\Delta I = 2 \cdot 10^{-3}$  А. Какой заряд прошел при этом по виткам катушки?

**2.385.** На длинный прямой соленоид, имеющий диаметр сечения  $D = 5$  см и содержащий  $n = 20$  витков на единицу длины, плотно надет круговой виток из медного провода сечением  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. Найдите силу тока в витке, если сила тока в обмотке соленоида увеличивается с постоянной скоростью  $dI/dt = 100$  А/с. Индуктивностью витка пренебречь.

**2.386.** Проводник длиной  $l$  может перемещаться со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ . Вектор скорости  $\vec{v}$  перпендикулярен вектору индукции  $\vec{B}$  и проводнику. Как направлена сила Лоренца, действующая на положительные и отрицательные заряды? Чему равна разность потенциалов, возникающая на концах проводника?

**2.387.** Прямолинейный проводник длиной  $l = 1,5$  м находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1$  Тл. Проводник вращается в плоскости, перпендикулярной линиям индукции поля, с угловой скоростью  $\omega = 300$  рад/с. Определите разность потенциалов на концах проводника как функцию расстояния от оси его вращения до одного из концов проводника и вычислите разность потенциалов, если ось вращения проходит: а) через один из концов проводника; б) через середину проводника; в) на расстоянии  $l/4$  от одного из концов.

**2.388.** Проводник длиной  $l$  перемещается со скоростью  $\vec{v}$  вдоль металлических рельсов, подключенных к источнику с ЭДС  $\mathcal{E}$ . Чему равна сила тока в цепи, если ее сопротивление  $R$ ? Получите ответ, используя закон сохранения энергии.

**2.389.** В длинном проводнике сила тока равна  $I$ . В магнитное поле, созданное этим током, помещают проволочную квадратную рамку сопротивлением  $R$ , со стороной  $a$ . Центр рамки находится на расстоянии  $r_0$  от проводника с током. Нормаль к плоскости рамки и вектор индукции магнитного поля образуют угол  $\alpha = 0^\circ$ . Какой заряд пройдет по рамке за время изменения силы тока в проводнике от первоначального значения  $I$  до нуля? (Магнитным полем индукционного тока в рамке пренебречь.)

**2.390.** Прямоугольная рамка со сторонами  $a$  и  $b$  движется равномерно со скоростью  $v$  в направлении, перпендикулярном к бесконечному длинному прямому проводнику с током, лежащему в плоскости рамки параллельно стороне  $b$ . Сила тока в проводнике равна  $I$ . Найдите ЭДС  $\mathcal{E}$ , индуцируемую в рамке, и определите направление индукционного тока. Расстояние от рамки до проводника в начальный момент времени равно  $l$ .

**2.391.** В цепи (см. рис. 2.62)  $R = 10$  Ом,  $L = 58$  мГн. Через какое время после замыкания ключа сила тока в цепи достигнет значения, равного половине установившейся силы тока?

**2.392.** Катушка сопротивлением  $0,7$  Ом и индуктивностью  $0,2$  Гн попадает на  $0,3$  с под напряжение  $100$  В. Как изменится при этом температура медного провода катушки, если его масса  $2,5$  кг, а изоляция не успевает нагреться?

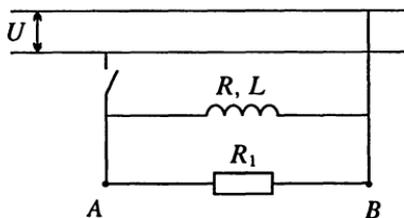


Рис. 2.63

**2.393.** Катушка индуктивностью  $L = 6$  Гн и активным сопротивлением  $R = 200$  Ом и резистор сопротивлением  $R_1 = 1000$  Ом присоединены параллельно к магистрали, в которой поддерживается напряжение  $U = 120$  В (рис. 2.63). Какое напряжение будет между точками  $A$  и  $B$  схемы через  $\tau = 0,001$  с после размыкания ключа?

## 2.8. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**2.394.** Прямоугольная рамка равномерно вращается с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , перпендикулярной оси вращения. По какому закону меняются ЭДС индукции и сила тока в рамке? При какой ориентации рамки относительно вектора  $\vec{B}$  ЭДС индукции и сила тока будут иметь максимальные значения? Активным сопротивлением рамки пренебречь.

**2.395.** Назовите виды потерь энергии в катушке индуктивности в случае, когда по ней течет: а) постоянный ток; б) переменный ток. Как

изменится активное сопротивление катушки, если в нее вставить сплошной железный сердечник? наборный сердечник?

**2.396.** Почему при разомкнутой вторичной цепи (при так называемом холостом ходе) трансформатор почти не потребляет энергии?

**2.397.** Если конденсатор залит диэлектрической жидкостью, обладающей некоторой проводимостью, то такой конденсатор эквивалентен конденсатору емкостью  $C$ , зашунтированному резистором сопротивлением  $R$ . Какой сдвиг фаз между силой тока и напряжением получится, если включить этот конденсатор в цепь переменного тока частотой  $\omega$ ?

**2.398.** Будет ли изменяться сдвиг фаз между токами в ветвях схемы (рис. 2.64) при изменении: а) сопротивления резистора  $R1$ ? б) сопротивления резистора  $R2$ ?

**2.399.** Может ли напряжение на конденсаторе (катушке индуктивности) (рис. 2.65) быть больше, чем напряжение на участке  $AB$ ? Какое условие должно выполняться для получения на конденсаторе максимального напряжения?

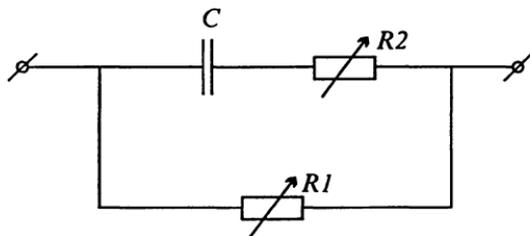


Рис. 2.64

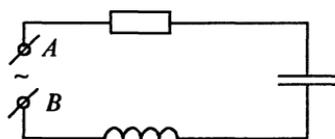


Рис. 2.65

**2.400.** Почему в цепях переменного тока, содержащих большое число электроприборов значительной индуктивности (например, дросселей), параллельно этим приборам подключаются конденсаторы?

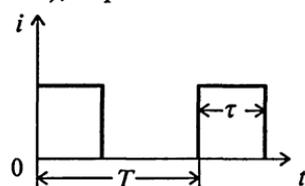


Рис. 2.66

**2.401.** На рисунке 2.66 показаны прямоугольные импульсы, период повторения которых в 4 раза больше их длительности. Определите действующее и среднее значения силы тока, если она скачком меняется от 0,5 А до нуля.

**2.402.** На рисунке 2.67, а – в показаны графики зависимостей от времени некоторого синусоидального напряжения  $u(t)$  и напряжения, полученного после одно- и двухполупериодного выпрямления. Каковы средние (за период) и действующие значения напряжений в этих трех случаях?

**2.403.** Определите среднее и действующее значения напряжения, зависимость которого от времени показана на рисунке 2.68.

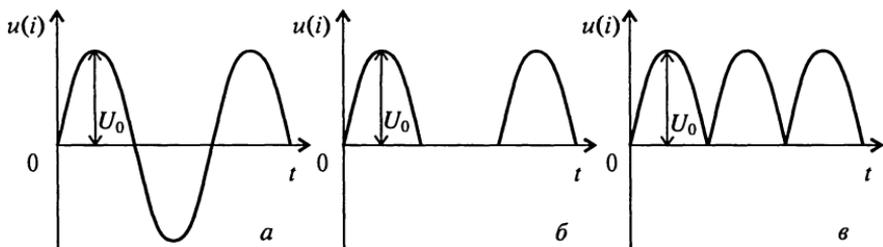


Рис. 2.67

**2.404.** Аккумулятор, заряд которого равен  $q = 7,2 \cdot 10^4$  Кл, заряжают выпрямленным синусоидальным током. График зависимости силы тока от времени изображен на рисунке 2.67, в. Амперметр, включенный в цепь, показывает силу тока  $I = 1,5$  А. Сколько времени надо заряжать аккумулятор?

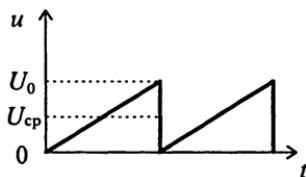


Рис. 2.68

**2.405.** Если увеличивать постоянное напряжение, под которым находится неоновая лампа, то при значении напряжения, равном 80 В, лампа загорается. Если затем уменьшать напряжение, то лампа гаснет, если значение напряжения равно 70 В. Лампу через потенциометр включают в сеть переменного тока и увеличивают напряжение. При каком действующем значении напряжения лампа вспыхнет? Какую долю от общего времени горения лампы составляет продолжительность свечения каждого из электродов, если действующее значение напряжения, под которым находится лампа, равно 120 В?

**2.406.** Батарея аккумуляторов с ЭДС  $\mathcal{E} = 20$  В соединена через резистор сопротивлением  $R = 80$  Ом последовательно с двухполупериодным выпрямителем (рис. 2.69), выходное напряжение которого имеет форму, показанную на рисунке 2.67, в, где  $U_0 = 100$  В. Амперметр  $A1$  – магнитоэлектрический,  $A2$  – тепловой. Внутреннее сопротивление выпрямителя 20 Ом, внутренним сопротивлением батареи можно пренебречь. Определите: а) показания приборов  $A1$  и  $A2$ ; б) энергию, выделяющуюся в резисторе за 10 с.

**2.407.** Тонкое металлическое кольцо массой  $m$  вращается с частотой  $f$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . Ось вращения  $OO'$  и направление вектора индукции  $\vec{B}$  взаимно перпендикулярны (рис. 2.70). Определите амплитудное и действующее значения силы тока в кольце.

**2.408.** С помощью векторных диаграмм найдите полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора и конденсатора, катушки индуктивности и конденсатора; параллельно соединенных резистора, конденсатора и катушки индуктивности.

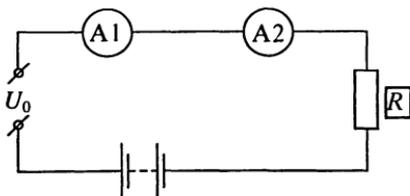


Рис. 2.69

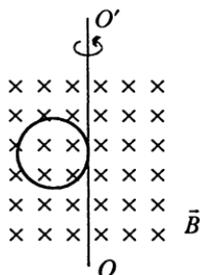


Рис. 2.70

**2.409.** Какое сопротивление переменному току ( $f = 1000$  Гц) представляет реостат длиной 50 см, если его активное сопротивление 100 Ом, число витков 2000 и площадь сечения витка  $15 \text{ см}^2$ ?

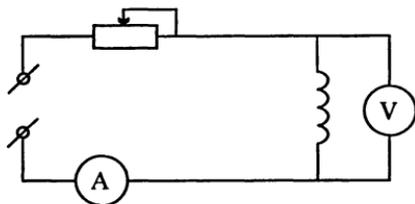


Рис. 2.71

**2.410.** Для определения индуктивности катушки собрали схему, изображенную на рисунке 2.71. При подключении цепи к источнику постоянного напряжения вольтметр показал 48 В, а амперметр 8 А. При подключении цепи к источнику переменного напряжения с частотой 50 Гц вольтметр показал 120 В, амперметр 12 А. Какова индуктивность катушки? Каков сдвиг фаз между напряжением и силой тока во втором случае?

**2.411.** Дроссель, соединенный последовательно с резистором сопротивлением  $R = 20$  Ом, присоединен к сети переменного тока ( $f = 50$  Гц) с действующим значением напряжения  $U = 120$  В. При этом дроссель находится под напряжением  $U_2 = 91$  В, а резистор – под напряжением  $U_1 = 44$  В. Какие мощности поглощаются резистором и дросселем?

**2.412.** Дроссель и резистор сопротивлением 50 Ом присоединены параллельно к источнику синусоидального тока. В дросселе сила тока равна 2,8 А, а в резисторе 2,5 А; полная сила тока равна 4,5 А. Определите мощность, потребляемую дросселем и резистором.

**2.413.** В цепь переменного тока с напряжением  $U = 440$  В и частотой  $f = 50$  Гц включены последовательно лампа и катушка индуктивности. Лампа, рассчитанная на напряжение 110 В и силу тока 1 А, работает в нормальном режиме. При замене этой лампы другой, рассчитанной на напряжение 220 В и силу тока 0,8 А, оказалось, что новая лампа также работает в нормальном режиме. Найдите сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  катушки.

**2.414.** На последовательно соединенные реостат и катушку индуктивностью 0,1 Гн подано напряжение частотой 50 Гц. Между напря-

жением и силой тока наблюдается сдвиг фаз в  $30^\circ$ . Чему равно сопротивление реостата? Включение конденсатора какой емкости последовательно с реостатом могло бы устранить сдвиг фаз?

**2.415.** Плоский конденсатор залит нитробензолом, удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость которого равны соответственно  $10^7$  Ом·м и 32. Найдите разность фаз между силой тока и напряжением, если частота колебаний тока равна: а) 50 Гц; б) 1000 Гц.

**2.416.** Определите диэлектрическую проницаемость жидкости, заполняющей плоский конденсатор, если известно, что ее удельное сопротивление составляет  $10^9$  Ом·м и при переходе от постоянного напряжения к переменному с частотой 50 Гц сила тока через конденсатор возрастает в 7 раз.

**2.417.** Для передачи только переменной составляющей напряжения к резистору сопротивлением 1 кОм, шунтирующему источник, последовательно подключают конденсатор. С резистора необходимо снять напряжение, которое не должно отличаться от напряжения на выходе источника более, чем на 5% в диапазоне частот от 50 до 10 кГц. Какую емкость должен иметь конденсатор?

**2.418.** По двум параллельным проводам текут переменные токи одной и той же частоты, отличающиеся по фазе на  $60^\circ$ . С какой силой взаимодействуют участки проводов длиной 1 м, если расстояние между ними 3 см? Действующие значения силы тока в проводах соответственно равны 5 и 1,5 А.

**2.419.** Последовательно соединенные катушка индуктивностью 0,1 Гн, резистор сопротивлением 2 Ом и конденсатор подключены к источнику переменного тока. Какую емкость должен иметь конденсатор, чтобы при частоте 50 Гц сила тока в цепи имела наибольшее значение? Какое максимальное напряжение можно подать на эту цепь без опасности пробоя конденсатора, если он выдерживает напряжение не более 400 В?

**2.420.** Подберите индуктивность дросселя  $L$  так, чтобы действующее значение напряжения  $U_2$  на выходе фильтра (рис. 2.72) при частоте переменного тока 100 Гц было в 10 раз меньше, чем действующее значение напряжения  $U_1$  на входе. Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  одинаковы и равны 10 мкФ.

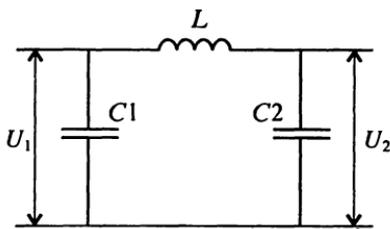


Рис. 2.72

**2.421.** Катушка с активным сопротивлением  $R = 10$  Ом и индуктивностью  $L$  включена в цепь переменного тока с действующим значением напряжения  $U = 127$  В и частотой  $f = 50$  Гц. Определите индуктивность катушки и ее импеданс, если известно, что она поглощает мощность  $P = 400$  Вт. Постройте векторную диаграмму.

**2.422.** Коэффициент мощности в цепи с последовательно соединенными конденсатором и резистором равен 0,6. Определите коэффициент мощности, если те же элементы включить параллельно.

**2.423.** Катушка индуктивностью  $L = 0,7$  Гн и активным сопротивлением  $r = 20$  Ом соединена последовательно с резистором сопротивлением  $R$ . К концам этой цепи приложено переменное напряжение с действующим значением  $U = 220$  В и частотой  $f = 50$  Гц. При каком значении сопротивления  $R$  в цепи будет выделяться максимальная мощность? Чему она равна?

**2.424.** Показания приборов, включенных в цепь переменного тока частотой 50 Гц (рис.2.73) таковы: сила тока 4,2 А, напряжение – 220 В, мощность 325 Вт. Определите сопротивление резистора  $R$  и емкость конденсатора  $C$ .

**2.425.** На участок цепи, состоящий из последовательно соединенных резистора сопротивлением 15 Ом и дросселя индуктивностью 0,1 Гн и активным сопротивлением 10 Ом, подается переменное напряжение частотой 50 Гц, действующее значение которого равно 220 В. Какая мощность будет потребляться участком, если последовательно подсоединить конденсатор, при котором разность фаз между силой тока и напряжением равна нулю? Какую емкость должен иметь конденсатор?

**2.426.** Емкость конденсатора в цепи(рис. 2.74) может плавно изменяться в широких пределах. ЭДС источника равна  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$ . Определите, как зависит мощность, отдаваемая источником, от емкости конденсатора. При каком значении емкости эта мощность будет максимальной и чему она равна?

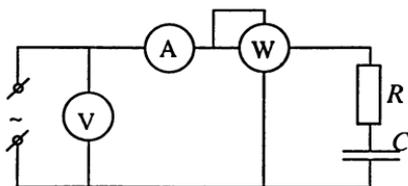


Рис. 2.73

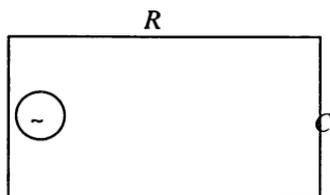


Рис. 2.74

**2.427.** Определите потери мощности в проводке, идущей от магистрали к потребителю, при следующих данных: передаваемая мощность равна 100 кВт, напряжение на шинах станции 220 В, сопротивление проводки 0,01 Ом, сдвиг фаз между силой тока и напряжением составляет  $30^\circ$ .

**2.428.** Мощность 5000 кВт передается при напряжении 100 кВ. Определите сопротивление проводов линии передачи, при котором потери мощности в них не превышают 10%. Почему для передачи энергии на большие расстояния пользуются высоким напряжением?

**2.429.** Какую массу должны иметь медные провода, необходимые для устройства проводки общей длиной  $l = 5$  км? Максимальное напряжение на шинах станции  $U_0 = 240$  В. Передаваемая потребителю мощность  $P = 60$  кВт. Допускается потеря напряжения в проводке 8%.

**2.430.** Ток от магистрали к потребителю подводится по медной проводке общей длиной 49 м и площадью сечения  $2,5$  мм<sup>2</sup>. Напряжение в магистрали 220 В. Потребитель намеревается сделать электрическую печь мощностью 600 Вт. Каким должно быть сопротивление печи?

**2.431.** Проводка от магистрали в здание осуществлена проводом, сопротивление которого 0,5 Ом. Напряжение в магистрали постоянно и равно 127 В. Какова допустимая потребляемая мощность, если напряжение на включенных в сеть приборах не должно падать ниже 120 В?

**2.432.** По сети длиной 5 км необходимо передать мощность 5 кВт под напряжением 110 В. Какого минимального диаметра должен быть медный провод, чтобы потери мощности в сети не превышали 10% от передаваемой мощности?

## 2.9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Свободные и вынужденные колебания в контуре

**2.433.** Почему ток в  $LC$ -контуре не прекратился в тот момент, когда конденсатор полностью разрядился? Как сила тока зависит от времени в идеальном ( $R = 0$ ) и реальном ( $R > 0$ ) контуре?

**2.434.** Почему трудно сконструировать колебательный контур, в котором возникли бы колебания очень низкой частоты (например, 0,01 Гц) или очень высокой (например,  $10^{10}$  Гц)?

**2.435.** Как изменятся параметры колебательного контура, если в катушку индуктивности ввести: а) железный сердечник; б) медный сердечник; в) сердечник из диэлектрика?

**2.436.** Какие элементы контура и в каком виде накапливают (запасают) энергию? Как вычислить запасенную энергию и энергию, теряемую за один период колебаний?

**2.437.** Докажите, что сила тока смещения в плоском конденсаторе может быть выражена равенством:  $i_{см} = C \frac{dU}{dt}$ .

**2.438.** Конденсатор подключен к источнику гармонической ЭДС. Покажите, что сила тока смещения в конденсаторе равна силе тока проводимости в подводящих проводах.

**2.439.** На какой диапазон частот можно настроить колебательный контур, если его индуктивность  $2 \cdot 10^{-3}$  Гн, а емкость может меняться от 60 до 480 пФ?

**2.440.** Изменится ли логарифмический декремент затухания, если, не меняя длины катушки контура, увеличить число витков в ней в  $n$  раз (диаметр витков остается без изменения)?

**2.441.** Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 7 мкФ и катушки, индуктивность которой 0,23 Гн, а сопротивление 40 Ом. Конденсатору сообщают заряд  $5,6 \cdot 10^{-4}$  Кл. Найдите: а) период колебаний, возникающих в контуре; б) логарифмический декремент затухания колебаний; в) закон изменения во времени разности потенциалов на обкладках конденсатора.

**2.442.** Батарея, состоящая из двух конденсаторов емкостью по 2 мкФ каждый, разряжается через катушку ( $L = 1$  мГн,  $R = 50$  Ом). Возникнут ли при этом колебания, если конденсаторы соединены: а) параллельно; б) последовательно?

**2.443.** Определите относительную разность между частотой свободных колебаний  $\omega_C$  и собственной частотой  $\omega_0$  контура с добротностью  $Q$ , т.е. отношение  $(\omega_0 - \omega_C)/\omega_0$ .

**2.444.** За какое число периодов амплитуда затухающих колебаний в контуре убывает в  $e$  раз? Энергия колебаний убывает в  $e$  раз? Логарифмический декремент затухания колебаний равен  $\delta$ .

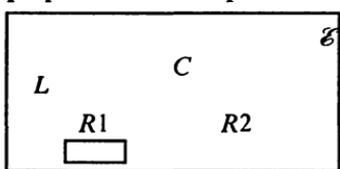


Рис. 2.75

**2.445.** В установке, собранной по схеме рисунка 2.75, все сопротивления, кроме  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 50$  Ом, ничтожно малы. Индуктивность катушки  $L = 0,1$  Гн, емкость конденсатора  $C = 1$  мкФ, ЭДС элемента  $\mathcal{E} = 1,4$  В. Ключ замыкают и, после того как ток в катушке установится, раз-

мыкают. Определите: а) начальную энергию колебаний, которые возникнут в контуре ( $R_1, L, C$ ) после размыкания ключа; б) энергию колебаний через 0,2 с после размыкания ключа.

**2.446.** Какую мощность потребляет контур с активным сопротивлением 0,23 Ом при поддержании в нем незатухающих колебаний с амплитудой тока 0,04 А?

**2.447.** Контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 3 \cdot 10^{-5}$  Гн и сопротивлением  $R = 1$  Ом и конденсатора емкостью  $C = 2000$  пкФ. Какую мощность должен потреблять контур, чтобы в нем поддерживались незатухающие колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе  $U_m = 0,5$  В?

**2.448.** Определите логарифмический декремент затухания колебаний в контуре с конденсатором емкостью  $C = 2000$  пФ и катушкой индуктивностью  $L = 0,15$  мГн, если на поддержание в этом контуре

незатухающих колебаний с максимальным напряжением на конденсаторе  $U_m = 0,9$  В требуется мощность  $P = 10$  мВт.

**2.449.** В контуре, состоящем из катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости, создаются вынужденные колебания. Если емкость увеличить на  $\Delta C = 0,01 C_0$  ( $C_0$  – емкость, соответствующая максимальной амплитуде колебаний силы тока), то сила тока в контуре уменьшится в  $n = 1,5$  раза. Определите логарифмический декремент затухания контура.

## Электромагнитные волны

**2.450.** Чему равно среднее за период значение вектора Умова – Пойнтинга в плоской бегущей электромагнитной волне? в стоячей волне? Каков физический смысл этого вектора?

**2.451.** Генератор переменной ЭДС подключен к отрезку длинной линии, каждая единица длины которой обладает емкостью  $C_0$  и индуктивностью  $L_0$ . При каких условиях в линии будет существовать: а) чисто бегущая волна; б) чисто стоячая волна?

**2.452.** При каких значениях частоты генератора в линии длиной  $l$  будет наблюдаться резонанс, если: а) конец линии замкнут накоротко, а внутреннее сопротивление генератора  $r \rightarrow 0$ ; б) конец линии разомкнут,  $r \rightarrow \infty$ ; в) конец линии замкнут накоротко,  $r \rightarrow 0$ ?

**2.453.** По какому закону убывает с расстоянием амплитуда напряженности электрического поля сферической (цилиндрической) электромагнитной волны, если потери энергии в среде отсутствуют?

**2.454.** Электромагнитная волна с частотой  $f = 360$  МГц переходит из вакуума в немагнитную среду с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 4,0$ . Определите изменение ее длины волны.

**2.455.** Плоская электромагнитная волна с частотой  $f = 10$  МГц распространяется в слабо проводящей среде с удельным сопротивлением  $\rho = 1$  Ом·см и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9$ . Определите отношение амплитуд плотностей сил токов проводимости и смещения.

**2.456.** Распространяющаяся в вакууме плоская электромагнитная волна, напряженность электрического поля которой изменяется по закону  $E = E_0 \cos(\omega t - kx)$ , наводит ЭДС индукции в квадратном контуре со стороной  $l = 50$  см. Расположение контура показано на рисунке 2.76. Найдите ЭДС индукции как функцию времени, если  $E_0 = 50$  В/м, частота  $f = 100$  МГц.

**2.457.** Плоская гармоническая электромагнитная волна имеет следующие параметры:  $E_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  В/м,  $\lambda = 100$  м. Какая энергия переносится волной за время  $\tau = 10$  мин через сечение площадью  $S = 1$  м<sup>2</sup>, расположенное перпендикулярно скорости распространения волны?

**2.458.** Короткозамкнутый отрезок двухпроводной линии длиной 1,2 м резонирует с основной частотой генератора. Во сколько раз амплитуды напряжения и силы тока для стоячей электромагнитной волны в точке, расположенной на расстоянии 0,5 м от конца линии, меньше максимальных значений амплитуды напряжения и амплитуды силы тока в линии?

**2.459.** Двухпроводная линия представляет собой двужильный кабель (рис. 2.77). Расстояние между жилами  $D = 20$  мм, диаметр жилы  $d = 4$  мм. Диэлектрическая проницаемость изоляции  $\epsilon = 4$ . Чему равно волновое сопротивление такого кабеля?

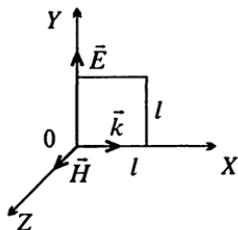


Рис. 2.76

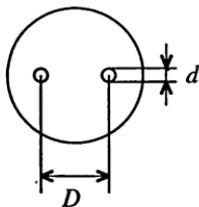


Рис. 2.77

**2.460.** Определите периоды собственных колебаний  $T_k$  двухпроводной линии длиной  $l$ , разомкнутой на обоих концах и погруженной в воду. Потерями энергии в линии пренебречь.

## Раздел 3 ОПТИКА

### 3.1. ПРИРОДА СВЕТА

**3.1.** Какие длины электромагнитных волн соответствуют границам оптического (видимого) интервала?

**3.2.** Почему мы видим предметы? Какие оптические явления при этом существенны?

**3.3.** Чем определяется цвет того или иного предмета (прозрачного, непрозрачного)?

**3.4.** Существуют светофильтры, пропускающие свет всех цветов, кроме зеленого. Другие светофильтры пропускают только красный свет. Проходящий свет в обоих случаях воспринимается глазом как красный. Предположим, что у вас в руках красный светофильтр. Как можно экспериментально установить, относится он к первому или второму типу?

**3.5.** Какими свойствами должен обладать предмет, чтобы быть невидимым? Мог ли видеть «человек-невидимка», рожденный фантазией Г. Уэллса?

**3.6.** Определите среднее значение амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей излучения Солнца вблизи Земли, принимая для солнечной постоянной значение  $1,4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>.

**3.7.** Стоячие световые волны наблюдать трудно из-за малой длины волны света. Впервые такой эксперимент был осуществлен в 1890 г. немецким физиком Винером. Для наблюдения стоячих волн Винер помещал фотографическую пластинку  $P$  с тонким слоем фоточувствительной эмульсии (толщина меньше  $1/20$  длины волны света) под очень малым углом  $\alpha$  к металлическому зеркалу  $Z$ , расположенному горизонтально (рис. 3.1). Система кратковременно освещалась параллельным пучком монохроматического света, падающим нормально к зеркалу. После проявления фотопластинки на ней под микроскопом была отчетливо видна система параллельных светлых и темных полос. Объясните их происхождение. Какая полоса, светлая или темная, должна получиться в месте соприкосновения пластинки и зеркала?

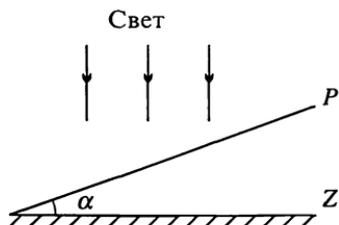


Рис. 3.1

Определите расстояние между соседними темными полосами в опытах Винера, если  $\alpha = 10^{-3}$  рад, а длина волны света  $\lambda = 0,55$  мкм.

3.8. В опыте, подобном опыту Винера (см. задачу 3.7), фотопластинка  $P$  имеет длину 1 см. Один ее конец соприкасается с зеркалом  $Z$ , а другой отделен от него небольшой прокладкой из слюды толщиной  $10^{-3}$  см. Расстояние между образовавшимися на пластинке соседними темными полосами оказалось равным 0,25 мм. Какова длина волны использовавшегося света?

Равным 0,25 мм. Какова длина волны использовавшегося света?

## 3.2. ФОТОМЕТРИЯ

### Световой поток. Сила света. Освещенность

3.9. На рисунке 3.2 показана зависимость относительной спектральной световой эффективности  $V$  от длины волны  $\lambda$ . Одинаковая ли мощность излучения соответствует световому потоку в 1 лм, если длина волны света лежит в узком спектральном интервале  $\Delta\lambda$  в окрестности длин волн  $\lambda_1 = 500$  нм,  $\lambda_2 = 550$  нм,  $\lambda_3 = 600$  нм?

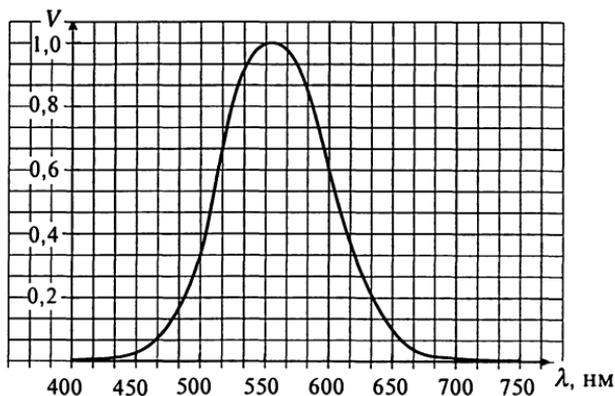


Рис. 3.2

3.10. Зная, что механический эквивалент света в узком спектральном интервале  $\Delta\lambda$ , соответствующем максимуму чувствительности глаза ( $\lambda = 555$  нм), равен  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Вт/лм, оцените мощность излучения,

соответствующую световому потоку в 1 лм, в том же спектральном интервале в окрестности длин волн  $\lambda_1 = 500$  нм,  $\lambda_2 = 650$  нм.

**3.11.** Точечный источник имеет силу света 10 кд. Какой полный световой поток создает этот источник?

**3.12.** В полдень во время весеннего и осеннего равноденствия Солнце стоит на экваторе в зените. Во сколько раз в это время освещенность поверхности Земли на экваторе больше освещенности на широте  $60^\circ$ ?

**3.13.** Минимальный световой поток, воспринимаемый глазом человека с нормальным зрением, составляет около  $10^{-13}$  лм. Оцените амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей световой волны при таком световом потоке, если площадь поверхности зрачка глаза в темноте  $\sigma = 0,4$  см<sup>2</sup>.

**3.14.** Воспользовавшись данными условия предыдущей задачи, определите, может ли наблюдатель заметить темной ночью огонек свечи, находящейся на расстоянии 3 км от него. Силу света свечи принять равной 1 кд, поглощением света в атмосфере пренебречь.

**3.15.** Луна в полнолуние создает освещенность площадки земной поверхности при нормальном падении света, равную 0,25 лк. На каком расстоянии электрическая лампа, имеющая силу света в данном направлении 25 кд, создает такую же освещенность?

**3.16.** Обычная лампа накаливания мощностью 60 Вт создает световой поток 500 лм. Оцените световую эффективность лампы, т.е. определите, какая доля мощности лампы приходится на излучение в видимой части спектра. Источник света в 1 кд в полосе частот видимого света создает поток излучения, равный 20,3 мВт.

**3.17.** Точечный источник света находится над полусферой на высоте, равной ее диаметру (рис. 3.3). Определите освещенность в той точке поверхности полусферы, в которую лучи падают под углом  $35^\circ$ . Сила света источника 50 кд; радиус полусферы 1 м.

**3.18.** Точечный источник  $S$  (рис. 3.4), сила света которого  $I$ , находится над горизонтальной плоскостью на высоте  $SM = h$ . Сбоку от него расположено плоское зеркало  $Z$ , отражающее свет в точку  $M$ . Определите освещенность в точке  $M$ , если  $SM = SZ$ , а коэффициент отражения зеркала равен  $R$ . Какой будет освещенность в той же точке, если зеркало убрать?

**3.19.** На столе лежит книга на расстоянии  $l = 1$  м от основания перпендикуляра, опущенного из точки, где находится лампа, на плоскость стола. Лампа может перемещаться вверх и вниз. На какой высоте  $h$  надо поместить лампу, чтобы освещенность книги была наибольшей?

**3.20.** Какой кривой светораспределения должна обладать лампа, чтобы создавать равномерную освещенность на плоском столе, над которым она подвешена? (Кривая светораспределения – это построенная в сферических координатах зависимость силы света источника от

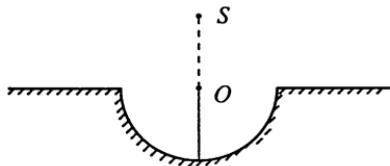


Рис. 3.3

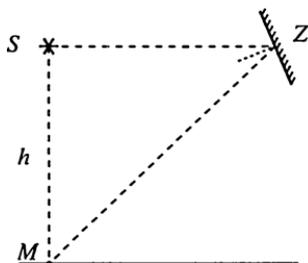


Рис. 3.4

угла  $\varphi$ , образуемого направлением, соответствующим максимальной силе света  $I_0$ , и данным направлением.)

**3.21.** Максимальная освещенность горизонтальной поверхности, создаваемая точечным источником света, находящимся на высоте  $h = 2$  м над ней, равна  $E_0 = 25$  лк. Между источником света и поверхностью помещают собирающую линзу с оптической силой  $D = 1,25$  дптр так, чтобы источник света находился в ее фокусе. Какой будет средняя освещенность под линзой? Диаметр линзы считать много меньшим фокусного расстояния.

**3.22.** Освещенность, создаваемая солнечными лучами за пределами земной атмосферы при нормальном падении света на площадку, примерно равна  $10^5$  лк. Оцените силу света.

**3.23.** Для печатания фотоснимка при лампе с силой света 40 кд, находящейся на расстоянии 1 м, требуется экспозиция 2 с. Какая нужна экспозиция при лампе с силой света 30 кд и расстоянии 1,5 м? Считать, что энергия, полученная фотоснимком в первом и втором случаях, должна быть одинаковой.

**3.24.** При фотографировании объекта, освещенного 100-ваттной лампой на расстоянии 1 м, требуется экспозиция 8 с. Какой должна быть экспозиция при освещении объекта двумя 100-ваттными лампами, находящимися на расстояниях 3 и 4 м, если энергия, попавшая на фотопленку, должна быть такой же, как в первом случае?

**3.25.** Общий световой поток, излучаемый прямой накаленной нитью длиной  $l = 60$  см, равен  $\Phi = 132$  лм. Определите наибольшую освещенность плоской поверхности, параллельной нити и находящейся на расстоянии  $a = 5$  см от нее.

**3.26.** Освещенность, необходимая при чтении, составляет  $E = 30$  лк. Свет от электрической лампы без плафона, находящейся на расстоянии  $h = 0,8$  м, падает на рабочее место под углом  $\alpha = 60^\circ$ . Какой минимальной мощности лампу следует взять для чтения, если световая отдача  $\eta = 12,5$  лм/Вт?

## Яркость. Светимость

3.27. С какой целью электрические лампы часто делают из матового стекла или помещают в матовый колпак?

3.28. У ламбертовых источников света яркость не зависит от направления луча зрения. Как зависит от направления сила света таких источников? Линейный размер источника считать малым по сравнению с расстоянием до точки наблюдения.

3.29. Получите связь между яркостью  $L$  и светимостью  $M$  ламбертовых источников света.

3.30. Докажите, что поверхностная яркость источника в данном направлении  $L_\varphi$  равна отношению освещенности  $E$  удаленной площадки, перпендикулярной к этому направлению, к телесному углу  $\Omega$ , под которым виден источник с этой площадки.

3.31. Предположим, что диаметр Луны стал вдвое больше. Изменится ли при этом яркость Луны и освещенность, создаваемая ею на поверхности Земли в полнолуние?

3.32. Яркость Солнца за пределами земной атмосферы  $L_C = 1,5 \cdot 10^9$  Кд/м<sup>2</sup>, а средняя яркость полной Луны  $L_L = 2,5 \cdot 10^3$  Кд/м<sup>2</sup>. Учитывая, что Луна светит отраженным светом, оцените альbedo Луны  $\alpha$ , равное доле энергии солнечного излучения, отражаемого лунной поверхностью в видимой области спектра. Солнце и Луну считать ламбертовыми источниками.

3.33. Используя условие задачи 3.32, а также значение солнечной постоянной за пределами земной атмосферы ( $1,4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>), найдите световую эффективность Солнца (см. задачу 3.16).

3.34. Пользуясь данными задачи 3.32, определите освещенность, создаваемую Солнцем при нормальном падении солнечных лучей на поверхность Земли, пренебрегая влиянием атмосферы. Найдите также освещенность, создаваемую полной Луной при тех же условиях. Видимые с Земли угловые диаметры Солнца и Луны примерно одинаковы и равны  $\alpha = 30' \approx 0,01$  рад.

3.35. В параллельном пучке света расположен двугранный прямой угол (рис. 3.5) так, что яркость граней одинакова. Коэффициенты отражения граней  $R_1$  и  $R_2$ . Грани рассеивают свет по закону Ламберта. Определите углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

3.36. Какова светимость волоска электрической лампы, если излучаемый ею световой поток равен 400 лм, длина волоска равна 60 см, а диаметр 0,04 мм?

3.37. На киноэкран размером  $3 \times 4$  м, рассеивающий свет по закону Ламберта с коэффициентом отражения 0,8, падает световой поток 1600 лм. Каковы освещенность, светимость и яркость экрана?

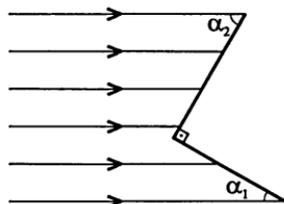


Рис. 3.5

**3.38.** Сквозь отверстие в ставне в комнату падает пучок солнечного света, образующий зайчик на листе белой бумаги. Площадь зайчика  $80 \text{ см}^2$ , освещенность  $10^4$  лк, коэффициент отражения бумаги 0,8. Какова освещенность: а) потолка комнаты над листом бумаги, если высота комнаты 4 м; б) стены на высоте 2 м от пола? Стена находится от зайчика на расстоянии 3 м и расположена перпендикулярно к плоскости падения солнечных лучей на пол.

### 3.3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

#### Временная когерентность

**3.39.** Можно ли наблюдать интерференционную картину, используя в качестве источников света две лампы накаливания?

**3.40.** Будет ли наблюдаться интерференционная картина от двух точечных источников, создающих волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях?

**3.41.** Пусть спектр излучения некоторого источника занимает интервал  $\Delta\nu$  в окрестности частоты  $\nu$ . Каковы время и длина когерентности у такого источника? Какую разность фаз приобретают за время когерентности частотные компоненты, находящиеся на краях интервала  $\Delta\nu$ ?

**3.42.** Какова средняя длина классического волнового пакета (цуга) для света, испущенного изолированным атомом, если считать, что атом излучает в течение  $10^{-8}$  с?

**3.43.** Каковы время и длина когерентности излучения гелий-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм), если ширина линии излучения примерно равна 0,01 нм?

**3.44.** Пусть имеются два идеальных (точечных и монохроматических) источника света одной и той же поляризации. Какой вид имеют в пространстве поверхности одинаковой интенсивности? Как выглядит интерференционная картина на экране при различных его положениях относительно источников?

**3.45.** Как изменятся ответы на вопросы из предыдущей задачи, если интерференция наблюдается не в вакууме, а в среде с известным показателем преломления?

**3.46.** Каков максимальный порядок интерференционных полос, которые можно было бы получить с данным источником света, если известны его время когерентности и средняя длина волны?

**3.47.** Свет от источника проходит через фильтр, после которого ширина спектра  $\Delta\lambda$  уменьшается вдвое. Как изменился при этом максимальный порядок наблюдаемых интерференционных полос?

3.48. Интерференционная картина, полученная при помощи установки с источником белого света, сфотографирована на цветную пленку два раза: один раз непосредственно, а другой – через светофильтр с известной полосой пропускания. Чем различаются картины на фотоснимках?

3.49. Покажите, что при сложении двух гармонических колебаний одинаковой частоты средняя по времени энергия результирующего колебания равна сумме энергий слагаемых колебаний, если: а) колебания имеют одинаковое направление, но некогерентны, причем все значения разности фаз равновероятны; б) колебания взаимно перпендикулярны.

### Интерференционные схемы. Пространственная когерентность

3.50. Каков принцип практического осуществления интерференции света? Как он воплощается в известных вам схемах?

3.51. На рисунке 3.6 изображена схема классического интерференционного опыта, впервые выполненного в 1802 г. Т. Юнгом. В опыте Юнга на пути света от источника (например, Солнца) ставится экран с узкой щелью  $S$  (или небольшим отверстием). За ним на расстоянии  $l$  располагается второй экран с двумя параллельными щелями  $S_1$  и  $S_2$ , ориентированными так же, как щель  $S$ . На третьем экране  $\mathcal{E}$ , находящемся на расстоянии  $L$  от парных щелей, наблюдаются темные и светлые полосы. Объясните их происхождение. Зависит ли контрастность полос от ширины  $b$  входной щели?

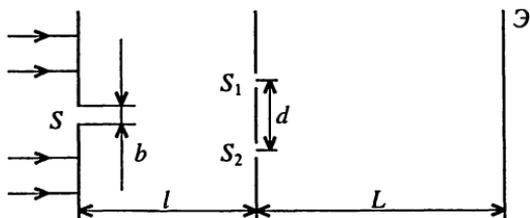


Рис. 3.6

3.52. Имеет ли значение для успеха опыта Юнга ширина щелей  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S$  (см. задачу 3.51)? Как будет меняться наблюдаемая картина при увеличении расстояния  $d$  между щелями  $S_1$  и  $S_2$  (см. рис. 3.6)? расстояния  $l$  между первым и вторым экранами? ширины  $b$  входной щели?

3.53. Сравните параметры известных вам интерференционных схем. Что служит в них источниками когерентных волн? От чего зави-

сит апертура интерференции? Пригодна ли та ли иная схема для демонстрационного эксперимента?

**3.54.** Сравните в качестве возможных источников света для интерференционных опытов звезду, Солнце, лампу накаливания и лазер. Каким преимуществом по сравнению с другими источниками света обладают лазеры?

**3.55.** Какое изменение в интерференционной картине будет наблюдаться, если щель  $S_1$  в установке Юнга (см. рис. 3.6) покрыть экраном, частично поглощающим свет, но не вносящим фазового сдвига?

**3.56.** В опыте Юнга при увеличении ширины входной щели интерференционная картина исчезает. Как следует изменить другие параметры установки, чтобы восстановить картину?

**3.57.** Объясните, почему при использовании лазера в качестве источника света в опыте Юнга входная щель  $S$  (см. рис. 3.6) не нужна (свет от лазера направляется прямо на экран с двумя щелями  $S_1$  и  $S_2$ ).

**3.58.** В схеме Юнга одна из щелей закрыта стеклянной пластинкой. Что происходит с интерференционной картиной при изменении толщины пластинки?

**3.59.** В опыте Юнга в качестве источника света используется гелий-неоновый лазер ( $\lambda = 632,8$  нм). Расстояние между щелями 0,5 мм, расстояние от щелей до экрана 5 м. Найдите ширину интерференционной полосы и положение светлых полос нулевого, первого и второго порядков.

**3.60.** В опыте Юнга одна из щелей закрывается тонкой стеклянной пластинкой, в результате чего интерференционная картина смещается на пять полос. Какова толщина пластинки  $h$ , если длина волны излучения  $\lambda = 632,8$  нм? Показатель преломления стекла 1,52.

**3.61.** В опыте Юнга используется источник белого света со светофильтром, пропускающим полосу длин волн  $\Delta\lambda = 0,06$  нм и средней длиной волны  $\lambda = 6000$  нм. Одна из парных щелей закрывается стеклянной пластинкой. При какой максимальной толщине пластинки еще сохраняется интерференционная картина? Показатель преломления стекла  $n = 1,52$ .

**3.62.** Источник света имеет вид узкой щели шириной 1 мм. Как далеко от экрана с двумя щелями (расстояние между щелями 0,5 мм) его нужно поместить, чтобы щели можно было считать когерентными источниками?

**3.63.** Еще в середине XVII в., задолго до опыта Юнга, попытка поставить аналогичный опыт была предпринята итальянским ученым Ф. Гримальди. В опыте Гримальди свет от Солнца падал непосредственно на парные щели  $S_1$  и  $S_2$  (отсутствовала входная щель  $S$  – см. рис. 3.6). Определите, при каком расстоянии между щелями их можно было бы считать когерентными источниками в опыте Гримальди? Угловой

диаметр Солнца  $\alpha = 0,01$  рад. (Решение задачи позволяет понять, почему опыт Гримальди окончился неудачей.)

**3.64.** Лучи от источника света (накаленная нить) проходят сквозь разрезанную на две половины собирающую линзу. При этом на экране получают интерференционные полосы. 1. Объясните их происхождение. 2. Определите расстояние между темными полосами интерференции при таких данных: нить находится на расстоянии 20 см от разрезанной линзы; фокусное расстояние линзы 10 см; расстояние между половинками линзы 1 мм (рис. 3.7); экран находится на расстоянии 450 см от линзы; длина волны 500 нм. 3. Каким должен быть диаметр нити для того, чтобы получилась интерференционная картина? 4. Сколько интерференционных полос видно на экране?

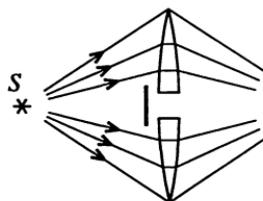


Рис. 3.7

**3.65.** Из собирающей линзы с оптической силой 4 дптр вырезали по диаметру пластинку некоторой толщины. Образовавшиеся половины линзы сдвинули до соприкосновения. Линзу поместили между источником света (освещенная щель) и экраном. При этом на экране наблюдаются интерференционные полосы шириной 0,1 мм. Расстояние от источника света до линзы 0,5 м, от линзы до экрана 0,3 м, длина волны излучения 550 нм. Определите толщину вырезанной части линзы.

**3.66.** На рисунке 3.8 изображена схема опыта с бипризмой Френеля. Лучи от источника света  $S$  (освещенная щель) проходят сквозь бипризму  $B$  и дают на экране  $KK$  интерференционную картину. Каков тупой угол  $\delta$  бипризмы, если при расстоянии  $d = 50$  см от щели до бипризмы и при расстоянии  $L = 450$  см от бипризмы до экрана интерференционные полосы, создаваемые излучением паров натрия ( $\lambda = 590$  нм) отстоят друг от друга на  $x = 1,1$  мм? Коэффициент преломления данного сорта стекла (легкий флинт)  $n = 1,578$ .

**3.67.** В опыте Ллойда (рис. 3.9.) световая волна, исходящая непосредственно из источника  $S$  (узкой щели), интерферирует с волной, отраженной от стекла  $З$ . В результате на экране  $Э$  образуется система

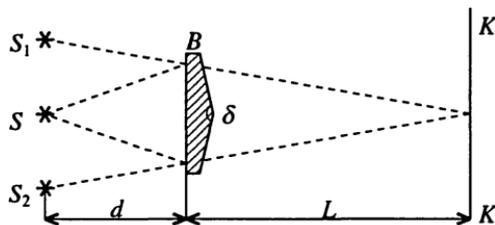


Рис. 3.8

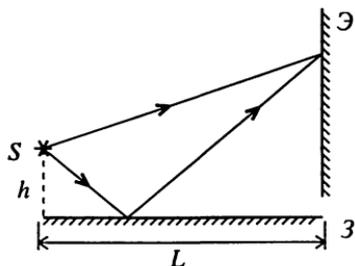


Рис. 3.9

интерференционных полос. Расстояние от источника до экрана  $L = 1$  м. При длине волны излучения  $\lambda = 600$  нм ширина интерференционной полосы на экране  $x = 0,25$  мм. На каком расстоянии  $h$  от плоскости зеркала находится источник?

**3.68.** В одном из опытов с интерференционной схемой Юнга (см. рис. 3.6) расстояние  $l$  между щелью  $S$  и экраном со щелями  $S_1$  и  $S_2$  было равно  $0,6$  м. В качестве источника света использовалась ртутная лампа с зеленым светофильтром ( $\lambda = 500$  нм). Как показал опыт, если поочередно ставить экраны с разными расстояниями между щелями  $S_1$  и  $S_2$ , то минимальное расстояние  $d$ , при котором интерференционная картина пропадает, равно  $2,0$  мм. Какой была в этом опыте ширина щели?

### Интерферометры

**3.69.** На рисунке 3.10 показана схема интерферометра, служащего для измерения показателей преломления прозрачных веществ. На щель  $S$ , расположенную в фокальной плоскости линзы, падает излучение натриевой лампы ( $\lambda = 589$  нм). Интерферирующие лучи проходят через стеклянные трубки  $1, 2$  длиной  $l = 10$  см с плоскопараллельными основаниями, заполненные воздухом. Когда воздух в трубке  $1$  заменили аммиаком, интерференционная картина на экране сместилась на  $N = 17$  полос. Показатель преломления воздуха  $n = 1,000277$ . Вычислите показатель преломления аммиака.

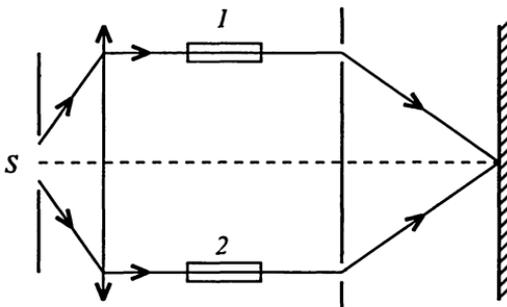


Рис. 3.10

**3.70.** В интерферометре Майкельсона в качестве источника света используется гелий-неоновый лазер ( $\lambda = 632,8$  нм), ширина спектральной линии излучения которого составляет  $0,01$  нм. При какой максимальной разности хода можно работать с таким источником? Оцените максимальный порядок интерференционной полосы, который при этом можно получить.

**3.71.** Установка Юнга (см. рис. 3.6) имеет следующие характеристики: расстояние между щелями  $d = 2$  мм, расстояние  $L = 3$  м. Щель

$S_1$  покрывают стеклянной пластинкой толщиной  $h = 0,01$  мм, при этом интерференционные полосы смещаются на  $x = 7,8$  мм. Найдите показатель преломления  $n$  стекла. С какой точностью определяется значение  $n$  в этом опыте, если смещение полос может быть измерено с точностью  $\Delta x = 0,1$  мм?

**3.72.** Для измерения показателя преломления газов в одно из плеч интерферометра Майкельсона помещают стеклянную трубку длиной  $l$ , которую заполняют сначала воздухом, затем исследуемым газом и наблюдают происходящие при этом смещения интерференционных полос. Определите показатель преломления хлора, если при заполнении им трубки длиной  $l = 2$  см интерференционная картина смещается на  $N = 20$  полос. Наблюдения проводятся с натриевой лампой ( $D$ -линия,  $\lambda = 589$  нм), показатель преломления воздуха  $n = 1,000277$ .

**3.73.** В двухлучевом интерферометре используется излучение ртутной лампы (оранжевая линия, состоящая из двух компонентов с длинами волн  $\lambda_1 = 579,03$  нм и  $\lambda_2 = 576,97$  нм). При каком наименьшем порядке интерференции четкость интерференционной картины будет наилучшей?

**3.74.** В интерферометре Майкельсона использовалось излучение натриевой лампы (желтая линия, состоящая из двух компонентов с длинами волн  $\lambda_1 = 589,6$  нм и  $\lambda_2 = 589$  нм). При поступательном перемещении одного из зеркал интерференционная картина периодически исчезает (почему?). Найдите перемещение зеркала, соответствующее двум последовательным появлениям наиболее четкой интерференционной картины.

### **Интерференция в тонких пленках. Полосы равной толщины**

**3.75.** Можно ли наблюдать на экране полосы равной толщины? Как должен быть аккомодирован глаз, чтобы наблюдать эти полосы непосредственно?

**3.76.** Светлой или темной кажется в отраженном (проходящем) свете пленка, толщина которой мала по сравнению с длиной волны?

**3.77.** Чем различаются картины колец Ньютона, наблюдаемые в отраженном и проходящем свете? Почему наблюдаются именно кольца? С каким радиусом кривизны лучше взять линзу, с большим или малым?

**3.78.** Как отразится на форме колец Ньютона наличие дефектов на поверхности линзы или пластинки (например, вмятин)?

**3.79.** В установке для наблюдения колец Ньютона линзу медленно поднимают над пластинкой. Опишите, как будет изменяться интерференционная картина.

**3.80.** Если между двумя сложенными вплотную линзами из крона ( $n_k = 1,5$ ) и флинта ( $n_f = 1,7$ ) поместить масло, показатель преломления которого имеет промежуточное значение между  $n_k$  и  $n_f$ , то точка соприкосновения линз будет окружена светлым пятном в отраженном свете и темным в проходящем. Объясните это явление.

**3.81.** Плоско-выпуклая линза из крона ( $n_k = 1,5$ ) лежит на пластинке, одна половина которой сделана из того же крона, а другая из флинта ( $n_f = 1,7$ ). Прослойка между линзой и пластинкой заполнена сероуглеродом ( $n = 1,63$ ). Какой будет картина ньютоновских колец в отраженном и проходящем свете?

**3.82.** Какую форму будут иметь полосы интерференции, если цилиндрическую собирающую линзу положить на плоскую стеклянную пластинку?

**3.83.** Тонкий стеклянный клин освещают один раз лампой накаливания, а другой – натриевой лампой. Чем различаются интерференционные картины?

**3.84.** Мыльная пленка в виде клина расположена вертикально. Под действием силы тяжести она постепенно становится все тоньше в верхней части и все толще в нижней. Как при этом меняется интерференционная картина?

**3.85.** Свет с длиной волны  $0,55$  мкм падает нормально на поверхность тонкого стеклянного клина. В отраженном свете на поверхности клина наблюдают систему интерференционных полос. Расстояние между соседними темными полосами  $0,21$  мм. Найдите; а) угол между гранями клина; б) степень монохроматичности света ( $\Delta\lambda/\lambda$ ), если исчезновение полос наблюдается на расстоянии  $1,5$  см от вершины клина.

**3.86.** Мыльная пленка, расположенная вертикально, вследствие стекания жидкости образует клин. Пленка освещается источником белого света через красный светофильтр ( $\lambda = 0,650$  мкм). Свет падает по нормали к поверхности пленки. Расстояние между соседними темными полосами на поверхности пленки равно  $x = 3$  мм. Определите угол между гранями клина. Показатель преломления мыльной воды  $n = 1,33$ .

**3.87.** На стеклянный клин падает нормально параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 632,8$  нм,  $\Delta\lambda = 0,1$  нм). Угол между гранями клина равен  $10''$ . Определите число интерференционных полос, приходящихся на отрезок длиной  $l = 1$  см, перпендикулярный ребру клина.

**3.88.** Какова толщина вертикально расположенной мыльной пленки в том месте, где в отраженном свете наблюдается пятая сверху темная интерференционная полоса? Показатель преломления мыльной воды равен  $1,33$ . Свет ( $\lambda = 0,633$  мкм) падает на пленку нормально.

**3.89.** Для получения воздушного клина между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками поместили параллельно ширине

пластинок тонкую проволочку на расстоянии  $l = 9$  см от другого края пластинок (рис. 3.11). При освещении поверхности пластинки светом натриевого пламени ( $\lambda = 589$  нм) наблюдали интерференционную картину. Определите диаметр  $d$  проволочки, если расстояние между двумя соседними темными полосами оказалось равным  $x = 2,64$  мм.

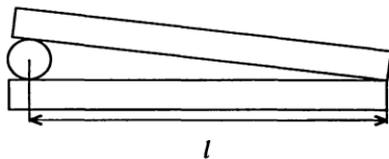


Рис. 3.11

**3.90.** Интерференционную картину, получающуюся в клине, используют для контроля концевых мер (калибров), служащих стандартами длины в механических цехах. Проверяемая мера представляет собой стальной брусок с двумя параллельными полированными гранями с определенным расстоянием между ними. Для сравнения меры  $K$  с эталонной мерой  $\mathcal{E}$  той же номинальной длины их прижимают одной из полированных граней к плоской стальной поверхности  $\Pi'$  (рис. 3.12.) Верхние грани обеих мер покрывают прозрачной плоской пластиной  $\Pi$ . Если концевые меры  $K$  и  $\mathcal{E}$  несколько различаются по длине, между пластиной и мерами образуются два воздушных клина, из-за чего при освещении монохроматическим светом наблюдаются полосы интерференции. Определите разность длин калибров  $h$ , если при расстоянии между ними  $d = 20$  см и длине волны света  $\lambda = 550$  нм ширина интерференционной полосы  $x = 5$  мм.

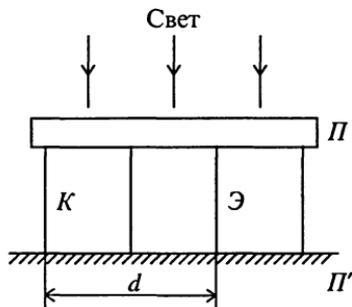


Рис. 3.12

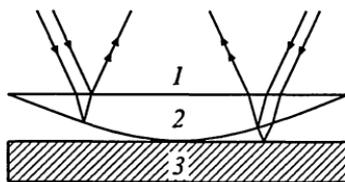


Рис. 3.13

**3.91.** На рисунке 3.13 показано расположение линзы и пластинки в опыте по наблюдению колец Ньютона в отраженном свете. Свет может отразиться от следующих поверхностей: от верхней поверхности линзы 1, от выпуклой нижней поверхности линзы 2 и от плоской поверхности темного стекла 3. Почему при расчете явления принимается во внимание возможность интерференции лучей, отразившихся от второй и третьей поверхностей, и не обсуждается возможность интерференции лучей, отразившихся от первой и второй поверхностей?

**3.92.** Плоско-выпуклая стеклянная линза, радиус кривизны которой равен  $0,85$  м, соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. Кольца Ньютона наблюдаются в отраженном свете. Измерения показали, что диаметр восьмого темного кольца равен  $4$  мм. Определите длину волны света. Каким станет диаметр этого кольца, если пространство между линзой и пластинкой заполнить водой?

**3.93.** Спектр натрия в видимой области состоит из двух линий с длинами волн  $589$  и  $589,6$  нм. Какое по счету темное кольцо Ньютона, соответствующее одной из этих линий, совпадает со следующим по счету темным кольцом, соответствующим другой линии? Наблюдение проводится в отраженном свете.

**3.94.** В установке для получения колец Ньютона используется свет натриевого пламени, спектр которого состоит из двух линий с длинами волн  $589$  и  $589,6$  нм. В местах совпадения темных колец Ньютона одной линии со светлыми кольцами другой интерференционная картина полностью размывается. Определите, какое по счету темное кольцо Ньютона одной линии совпадает со светлым кольцом другой линии и для какого следующего более высокого номера темного кольца первой линии интерференционная картина становится опять резко видимой. При решении задачи считать, что наблюдение ведется в отраженном свете.

**3.95.** Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны  $R = 40$  см соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. При этом в отраженном свете радиус некоторого кольца  $r_0 = 2,5$  мм. Наблюдая за этим кольцом, линзу осторожно отодвинули от пластинки на  $\Delta h = 5$  мкм. Каким стал радиус этого кольца?

**3.96.** На вершине сферической плоско-выпуклой стеклянной поверхности сошлифован плоский участок радиусом  $r_0 = 3$  мм, которым она соприкасается со стеклянной пластинкой. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы  $R = 150$  см. Найдите радиус 6-го светлого интерференционного кольца при наблюдении в отраженном свете с длиной волны  $\lambda = 655$  нм.

**3.97.** Собирающая линза положена на плоскую стеклянную пластинку, причем вследствие попадания пыли между линзой и пластинкой нет контакта. Диаметры 5-го и 15-го темных колец Ньютона, наблюдаемых в отраженном свете ( $\lambda = 589$  нм), равны соответственно  $0,7$  и  $1,7$  мм. Определите радиус кривизны поверхности линзы, обращенной к пластинке.

**3.98.** Наблюдатель измеряет ширину 10 колец Ньютона вдали от их центра. Она оказывается равной  $0,7$  мм. Ширина следующих 10 колец оказывается равной  $0,4$  мм. Наблюдение проводится в отраженном свете при длине волны  $589$  нм. Определите радиус кривизны поверхности линзы.

**3.99.** Пространство между плоско-выпуклой линзой с радиусом кривизны сферической поверхности  $1\text{ м}$  и стеклянной пластинкой заполнено сероуглеродом. Найдите радиус 10-го темного кольца при наблюдении интерференции в отраженном свете; длина волны света  $589\text{ нм}$ . Показатель преломления стекла считать равным  $1,5$ . Почему кольца Ньютона труднее наблюдать в условиях, указанных в задаче, чем при воздушной прослойке между линзой и пластинкой?

**3.100.** Кольца Ньютона получаются с помощью плоско-выпуклой линзы с радиусом кривизны  $R_1$ , положенной на вогнутую сферическую поверхность с радиусом кривизны  $R_2 > R_1$ . Кольца наблюдаются в отраженном свете. Определите радиус  $r_m$   $m$ -го темного кольца, если длина волны света равна  $\lambda$ .

**3.101.** В установке для наблюдения колец Ньютона плоско-выпуклая линза сделана подвижной и может перемещаться в направлении, перпендикулярном к пластинке. Что будет происходить с кольцами Ньютона при удалении и приближении линзы к пластинке? Для получения колец используется монохроматический свет.

**3.102.** Как будет меняться резкость колец Ньютона при перемещении линзы в установке, описанной в предыдущей задаче, если они наблюдаются в отраженном свете натриевой лампы. При ответе на вопрос учесть, что желтая линия натрия не монохроматична, а представляет собой две близкие спектральные линии с длиной волны  $\lambda_1 = 589\text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 589,6\text{ нм}$ .

### **Интерференция в тонких пленках. Полосы равного наклона**

**3.103.** Какова толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в отраженном свете она представляется зеленой ( $\lambda = 500\text{ нм}$ ), когда угол между нормалью и лучом зрения равен  $35^\circ$ ? Показатель преломления мыльной воды принять равным  $1,33$ .

**3.104.** На тонкую пленку ( $n = 1,33$ ) падает параллельный пучок белого света. Угол падения  $\alpha = 52^\circ$ . При какой толщине пленки зеркально отраженный свет будет наиболее сильно окрашен в желтый ( $\lambda = 0,6\text{ мкм}$ ) цвет?

**3.105.** Определите минимальную толщину пленки с показателем преломления  $n = 1,33$ , при которой свет с длиной волны  $0,64\text{ мкм}$  испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны  $0,40\text{ мкм}$  не отражается совсем. Угол падения света равен  $30^\circ$ .

**3.106.** Темной или светлой будет в отраженном свете мыльная пленка толщиной  $d = 0,1\lambda$ ? Пленка находится в воздухе.

**3.107.** Зимой на стеклах трамваев и автобусов образуются тонкие пленки наледи, окрашивающие все видимое сквозь них в зеленоватый

цвет. Оцените, какова наименьшая толщина этих пленок (показатель преломления наледи принять равным 1,33).

### Просветление оптики

**3.108.** Для уменьшения потерь света из-за отражения от поверхности стекла последние покрывают путем напыления в вакууме тонким слоем вещества (просветляющее покрытие) с показателем преломления  $n' = \sqrt{n}$ , где  $n$  – показатель преломления стекла. Покажите, что в этом случае амплитуды световых волн, отраженных от обеих поверхностей просветляющего слоя, будут одинаковыми. При какой толщине этого слоя коэффициент отражения стекла в направлении нормали будет равен нулю для света с длиной волны  $\lambda$ ?

**3.109.** На стекло с показателем преломления  $n = 1,7$  (тяжелый флинт) напыляется просветляющее покрытие из криолита. При какой наименьшей толщине слоя криолита ( $n' = 1,36$ ) произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра ( $\lambda = 0,55$  мкм)?

**3.110.** Почему просветленные объективы в отраженном свете кажутся лилово-фиолетовыми?

### 3.4. ДИФРАКЦИЯ

#### Дифракция Френеля

**3.111.** Можно ли наблюдать дифракцию света на обычной тарелке?

**3.112.** Пользуясь векторными диаграммами Френеля, сравните освещенности в центре дифракционной картины при дифракции на круглом отверстии в случаях, когда оно открывает различное число зон Френеля (0,5; 1; 2; 1,5; 2,5 зоны; все зоны – ширма отсутствует).

**3.113.** Рассмотрите дифракцию Френеля на непрозрачном диске, закрывающем различное число зон Френеля (1; 2; 3; 4; 5). Докажите, что в центре дифракционной картины должно находиться светлое пятно (пятно Пуассона).

**3.114.** Рассмотрите дифракцию на кольцевом отверстии и непрозрачном кольце.

**3.115.** Как изменится выражение для радиуса зоны Френеля, если: а) на отверстие или экран падает плоская волна; б) фронт падающей волны сферический радиусом  $a$ , а точка наблюдения находится далеко от отверстия ( $b \gg a$ )?

**3.116.** Если круглое отверстие (например, ирисовая диафрагма) увеличивается таким образом, что размер его, ранее равнявшийся одной зоне Френеля, доходит до двух зон, то освещенность в центре дифракционной картины падает почти до нуля, хотя поток световой энергии через увеличившееся отверстие возрастает почти вдвое. Каким образом согласуются эти два факта?

**3.117.** Пользуясь методом диаграмм Френеля, покажите, что интенсивность света, прошедшего сквозь круглое отверстие, пропускающее только половину первой зоны, приблизительно в два раза больше интенсивности при полном отсутствии препятствий.

**3.118.** Какова освещенность в фокусе зонной пластинки, если закрыты все зоны, кроме первой? Освещенность без пластинки равна  $E_0$ . Какой станет освещенность, если половину первой зоны закрыть непрозрачным полудиском; если четверть первой зоны (один квадрант) закрыть непрозрачным экраном?

**3.119.** Какова освещенность в центре дифракционной картины от круглого экрана, если он закрывает всю первую зону Френеля? Освещенность при отсутствии экрана равна  $E_0$ .

**3.120.** Точечный источник света  $S$ , излучающий свет с длиной волны  $\lambda = 550$  нм, освещает экран, расположенный на расстоянии  $l = 11$  м от источника света. Между источником света и экраном на расстоянии  $a = 5$  м от экрана находится ширма с круглым отверстием, диаметр которого  $d = 4,2$  мм. Будет ли освещенность в центре получающейся на экране дифракционной картины больше или меньше освещенности в той же точке при отсутствии ширмы?

**3.121.** Для определения длины волны монохроматического света точечный источник света  $S$  установили на расстоянии  $a = 0,8$  м от ирисовой диафрагмы  $D$ , вставленной в непрозрачный экран  $MM$  больших размеров (рис. 3.14). За этим экраном на расстоянии  $b = 0,8$  м от него поместили второй экран  $KK$ . При увеличении диаметра диафрагмы от 0 до  $d = 1$  мм на втором экране получается светлое пятно с максимальной освещенностью. Пользуясь этими данными, определите длину волны света.

**3.122.** Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм нормально падает на непрозрачный экран с круглым отверстием диаметром  $D = 1,2$  мм. На расстоянии  $b_1 = 18$  см за экраном на оси отверстия наблюдается темное пятно. На какое минимальное расстояние  $\Delta b$  нужно сместиться от этой точки вдоль оси отверстия, удаляясь от него, чтобы в центре дифракционной картины вновь наблюдалось темное пятно?

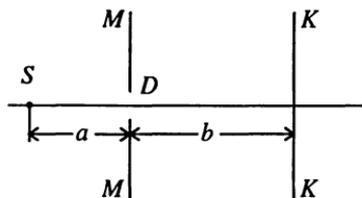


Рис. 3.14

**3.123.** Между источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого  $r$  можно менять в процессе опыта. Расстояния от диафрагмы до источника и экрана равны соответственно  $a = 100$  см и  $b = 125$  см. Определите длину волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины наблюдается при  $r_1 = 1$  мм, а следующий максимум – при  $r_2 = 1,29$  мм.

**3.124.** Определите радиус  $r_m$   $m$ -й зоны Френеля при условии, что на зонную пластинку падает плоская волна. Вычислите  $r_1$  для этого случая, полагая, что расстояния от зонной пластинки до точки наблюдения  $b = 10$  м и  $\lambda = 450$  нм.

**3.125.** Плоская волна падает на ширму с круглой диафрагмой диаметром  $d = 1$  мм. Получите выражение для расчета положений максимумов освещенности вдоль оси диафрагмы и найдите результат для трех максимумов, наиболее удаленных от ширмы. Длину волны света считать равной  $\lambda = 500$  нм.

**3.126.** Точечный источник света расположен на расстоянии  $a = 50$  см от ширмы с круглым отверстием радиусом  $r = 0,3$  мм. Найдите положение наиболее удаленного от ширмы максимума освещенности. Длину волны света считать равной  $\lambda = 500$  нм.

**3.127.** Плоская монохроматическая световая волна с интенсивностью  $I_0$  падает нормально на непрозрачный экран с круглым отверстием. Какова интенсивность света за экраном в точке, для которой отверстие: а) открывает первую зону Френеля, но внутренняя половина первой зоны закрыта (по диаметру) непрозрачным экраном; б) открывает первую зону Френеля, но половина отверстия перекрыта (по диаметру) прозрачным экраном, вносящим фазовый сдвиг  $\pi/2$ ?

**3.128.** На пути плоской световой волны ( $\lambda = 0,54$  мкм) поставили тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием  $f = 50$  см, непосредственно за ней установили диафрагму с круглым отверстием и на расстоянии  $b = 75$  см от диафрагмы – экран. При каких радиусах отверстия освещенность центра дифракционной картины на экране максимальна?

**3.129.** Зонная пластинка дает изображение источника, удаленного от нее на 3 м, на расстоянии 2 м от своей поверхности. Где получится изображение источника, если его отодвинуть в бесконечность?

**3.130.** Определите фокусное расстояние  $f$  зонной пластинки для света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм, если радиус пятого кольца этой пластинки равен  $r_5 = 1,5$  мм. Определите радиус первого кольца этой пластинки. Что произойдет, если пространство между зонной пластинкой и экраном заполнить средой с показателем преломления  $n > 1$ ?

**3.131.** Основное фокусное расстояние амплитудной плоской зонной пластинки равно  $f_0$ . Найдите ее остальные фокусные расстояния.

**3.132.** Освещенный предмет расположен на оси зонной пластинки на расстоянии  $a$  от нее. Самое дальнее от зонной пластинки изобра-

жение предмета получается на расстоянии  $b$ . На каких расстояниях  $b_k$  от пластинки получаются остальные изображения предмета?

**3.133.** Диск диаметром  $0,5$  см имеет на краях неровности размером около  $10$  мкм и освещается параллельным пучком света. Предположим, что пятно Пуассона видно, если неровности края диска перекрывают зону Френеля не больше, чем на одну четверть ее ширины. Вычислите минимальное расстояние до экрана, на котором можно видеть это пятно.

**3.134.** На ширму с отверстием радиусом  $r$  падает свет с длиной волны  $\lambda$ . За ширмой на расстоянии  $L$  находится экран. При каком расстоянии  $L$  становятся существенными дифракционные явления, если: а) фронт волны плоский; б) фронт волны сферический радиусом  $a$ ? Считать, что дифракционные явления существенны, если число зон Френеля, открываемых отверстием, меньше десяти.

**3.135.** На ширму с отверстием радиусом  $r$  падает свет с длиной волны  $\lambda$  от точечного источника, расположенного на расстоянии  $a$  от ширмы. Найдите минимальное число зон Френеля, открываемых отверстием при данной кривизне волнового фронта падающей волны.

**3.136.** Решите задачу 3.135, если  $\lambda = 500$  нм,  $r = 1$  мм,  $a = 0,5$  м. Можно ли при таких параметрах установки наблюдать дифракцию Фраунгофера? При каком наименьшем значении  $a$  это возможно?

### Дифракция Фраунгофера

**3.137.** На непрозрачный экран с круглым отверстием радиусом  $r$  падает свет с длиной волны  $\lambda$ . На расстоянии  $L$  от экрана наблюдается дифракционная картина. Как теоретически определить, реализуются в этом случае условия наблюдения дифракции по Френелю или по Фраунгоферу, если: а) фронт падающей волны плоский; б) фронт падающей волны сферический, а точка наблюдения отодвинута в бесконечность ( $L \rightarrow \infty$ )?

**3.138.** Как в условиях предыдущего вопроса можно было бы экспериментально определить, наблюдается дифракция по Френелю или по Фраунгоферу?

**3.139.** Опишите качественно дифракционную картину для случая дифракции Фраунгофера на узкой щели, пользуясь методом векторных диаграмм. Покажите, что интенсивность максимумов убывает с их порядковым номером.

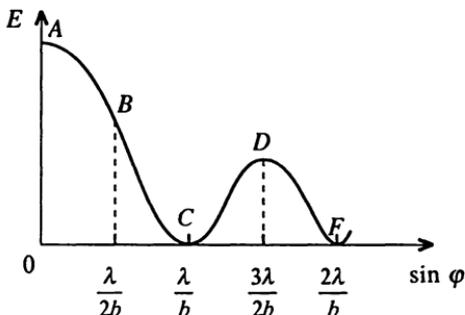


Рис. 3.15

**3.140.** На рисунке 3.15 приведена зависимость от синуса угла дифракции освещенности дифракционной картины при дифракции Фраунгофера на прямоугольной узкой щели. Постройте векторные диаграммы для точек  $A, B, C, D, F$ .

**3.141.** Изобразите (качественно) зависимость интенсивности света от  $\sin \varphi$  для дифракции Фраунгофера на одной щели. Как меняется вид зависимости при изменении ширины щели? (Рассмотрите случаи, когда  $b \gg \lambda$ ;  $b = \lambda$ ;  $b \ll \lambda$ .)

**3.142.** При дифракции Фраунгофера на прямоугольной щели с увеличением ширины щели вдвое поток проходящего через щель излучения увеличивается вдвое. В то же время амплитуда светового вектора в направлении  $\varphi = 0$  возрастает вдвое, так что интенсивность света должна возрасти вчетверо. Как разрешается этот парадокс?

**3.143.** Постройте в полярных координатах диаграмму излучения  $I(\varphi)$  щели шириной  $b$  в условиях, когда на щель падает плоская волна с длиной волны  $\lambda$ . Интенсивность света, излучаемого в направлении  $\varphi = 0$ , принять за единицу.

**3.144.** На щель шириной 2 мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 589 нм. Найдите углы, в направлении которых будут наблюдаться минимумы света.

**3.145.** На щель шириной  $2 \cdot 10^{-3}$  см падает нормально пучок монохроматического света с длиной волны  $5 \cdot 10^{-3}$  см. Определите ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на 1 м. (Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.)

**3.146.** На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ . Ширина щели равна  $6\lambda$ . Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум света?

**3.147.** Получите формулу, определяющую угловое положение минимумов при дифракции Фраунгофера на щели, пользуясь принципом Гюйгенса – Френеля и разбивая плоскость щели на зоны (зоны Шустера). Угол скольжения падающего луча относительно плоскости щели равен  $\alpha_0$ , ширина щели равна  $b_0$ . Плоскость падения перпендикулярна к оси щели.

**3.148.** Квадратное отверстие со стороной  $L_0 = 0,2$  см освещается параллельным пучком солнечных лучей, падающих нормально к плоскости отверстия. Найдите форму и размер изображения отверстия на экране, удаленном на 50 м от отверстия, если плоскость экрана параллельна плоскости отверстия. Границей освещенности на экране считать положение первого дифракционного минимума наиболее сильно отклоняемых лучей. Интервал видимого спектра принять равным 400 ... 700 нм.

**3.149.** Лазерный пучок света диаметром 1 см, расходимость которого определяется дифракцией, направлен на Луну. Каков диаметр освещаемой на Луне поверхности? Расстояние до Луны равно 384000 км, длину волны света считать равной 632,8 нм. Рассеянием света в атмосфере Земли пренебречь.

**3.150.** Круглое отверстие освещается параллельным пучком света с длиной волны  $\lambda$ . При каком радиусе отверстия размер светлого пятна на экране, отстоящем от отверстия на расстоянии  $l$ , будет минимален?

**3.151.** Оцените оптимальный радиус отверстия в камере-обскуре, т.е. радиус отверстия, при котором точечный источник изобразится на фотопластинке кружком минимального диаметра, если расстояние от источника света до камеры велико по сравнению с ее глубиной  $l$ .

**3.152.** Если свет от Солнца падает на экран через малое отверстие, то на экране получается изображение Солнца (светлый диск, а во время затмения – светлый серп) независимо от формы отверстия. Если же отверстие велико, мы получаем изображение отверстия. Объясните это и оцените соотношение между диаметром отверстия  $D$  и расстоянием  $l$  до экрана, при котором осуществляются первый и второй случаи.

### Дифракционная решетка

**3.153.** Постройте график зависимости интенсивности света от  $\sin \varphi$  в случае дифракции Фраунгофера на нескольких щелях ( $N = 2, 3, 4, \dots$ ). Чем различаются зависимости при разных значениях  $db$ ? Рассмотрите случаи  $db = 2, 3, 4$  ( $d$  – период решетки,  $b$  – ширина щели).

**3.154.** Дифракция Фраунгофера осуществляется сначала на дифракционной решетке, а затем на системе с тем же количеством щелей, но находящихся на различных, беспорядочно распределенных расстояниях друг от друга. Чем различаются наблюдаемые при этом дифракционные картины?

**3.155.** Как зависит дифракционная картина от степени пространственной когерентности падающего на решетку света?

**3.156.** Как оценить диапазон длин волн, который можно изучать при помощи данной дифракционной решетки?

**3.157.** На дифракционную решетку нормально падает свет от натриевого пламени ( $\lambda = 589$  нм). При этом для спектра третьего порядка получается угол отклонения  $10^\circ 11'$ . Какова длина волны, для которой угол отклонения во втором порядке равен  $6^\circ 16'$ ?

**3.158.** На дифракционную решетку, имеющую 50 штрихов на 1 мм, падает нормально параллельный пучок белого света. Какова разность углов отклонения: а) конца первого и начала второго спектров; б) конца второго и начала третьего спектров? Длины крайних красных и крайних фиолетовых волн принять равными 760 и 400 нм.

**3.159.** На решетку, постоянная которой равна 0,006 мм, нормально падает монохроматическое излучение. Угол между спектрами первого и второго порядков равен  $4^{\circ}38'$ . Определите длину волны.

**3.160.** Сколько штрихов на 1 мм содержит дифракционная решетка, если в спектре первого порядка, полученного с помощью линзы с фокусным расстоянием  $f = 50$  см при освещении светом натриевого пламени, расстояние между  $D_1$ -линией натрия ( $\lambda_1 = 589$  нм) и  $D_2$ -линией ( $\lambda_2 = 589,6$  нм) оказалось равным  $l = 0,12$  мм? При решении задачи принять, что углы дифракции малы ( $\cos \varphi \approx 1$ ).

**3.161.** Могут ли перекрываться спектры первого и второго порядков дифракционной решетки при освещении ее солнечным светом (700...400 нм)?

**3.162.** Сколько полных (не перекрывающихся даже частично) спектров может дать дифракционная решетка, если границами волн падающего света будут 500 и 600 нм?

**3.163.** Найдите условие, при котором равна нулю интенсивность  $m$ -го максимума для дифракционной решетки с периодом  $d$  и шириной щели  $b$ .

**3.164.** Опишите характер спектров дифракционной решетки, если ее постоянная равна: 1) удвоенной, 2) утроенной, 3) учетверенной ширине щели.

**3.165.** Какой максимальный порядок спектра может наблюдаться при дифракции света с длиной волны  $\lambda$  на решетке, период которой  $d$ ?

**3.166.** Определите длину волны, соответствующую спектральной линии, изображение которой, даваемое дифракционной решеткой в спектре третьего порядка, совпадает с изображением линии с длиной волны  $\lambda = 486,1$  нм в спектре четвертого порядка.

**3.167.** Зрительная труба гониометра с дифракционной решеткой поставлена под углом  $20^{\circ}$  к оси коллиматора. При этом в поле зрения трубы видна красная линия спектра гелия ( $\lambda_1 = 668$  нм). Чему равна постоянная дифракционной решетки, если обнаружено, что под тем же углом видна и синяя линия ( $\lambda_2 = 447$  нм) более высокого порядка? Наибольший порядок спектра, который можно наблюдать при помощи данной решетки для линии с длиной волны  $\lambda_1$ , равен 5. Свет падает на решетку нормально.

**3.168.** Дифракционная решетка, имеющая 200 штрихов на 1 мм, помещена на столике гониометра так, что свет, выходящий из коллиматора, падает на решетку нормально. Перед щелью коллиматора помещена разрядная трубка с гелием. Под каким углом к падающему на решетку пучку надо поставить зрительную трубу, чтобы в поле зрения совпали красная линия ( $\lambda_1 = 668$  нм) и фиолетовая линия более высокого порядка ( $\lambda_2 = 447$  нм)?

**3.169.** Чем определяется максимальная длина волны, спектр которой может получиться с помощью данной дифракционной решетки?

Определите постоянную, которую должна иметь решетка, способная давать спектр инфракрасного излучения с длинами волн до 100 мкм.

3.170. На рисунке 3.16 показана схема установки для наблюдения дифракции света на ультразвуке. Плоская световая волна ( $\lambda = 0,55$  мкм) проходит через кювету с водой  $K$ , в которой возбуждена стоячая ультразвуковая волна с частотой  $\nu = 4,7$  МГц. В результате дифракции света на оптически неоднородной периодической структуре в фокальной плоскости линзы  $L$  с фокусным расстоянием  $f = 35$  см возникает дифракционный спектр. Расстояние между соседними главными максимумами  $x = 0,6$  мм. Определите скорость ультразвука в воде.

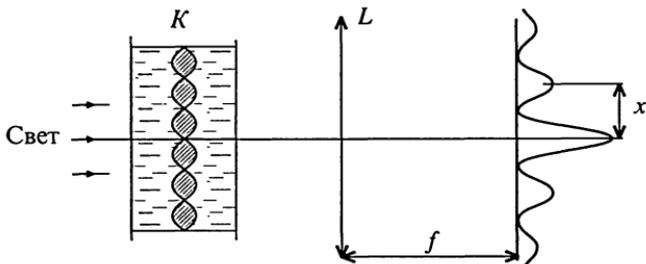


Рис. 3.16

3.171. Найдите условие появления главного дифракционного максимума при наклонном падении лучей на решетку (постоянная решетки  $d$ , угол падения  $\theta_0$ ). Какой вид принимает это условие, если  $d \gg \lambda$ , а порядок спектра  $m \ll d$ ?

3.172. Определите наибольший порядок спектра, который может образовать дифракционная решетка, имеющая 500 штрихов на 1 мм, если длина волны равна 590 нм. Рассмотрите два случая: а) свет падает на решетку нормально, б) свет падает под углом  $30^\circ$ .

3.173. Пучок рентгеновских лучей падает на решетку с периодом 1 мкм под углом  $89^\circ 30'$ . Угол дифракции для спектра второго порядка равен  $89^\circ$ . Найдите длину волны рентгеновских лучей.

3.174. Определите период решетки, для которой угловая ширина спектра первого порядка для видимого света равна  $20^\circ$ . Считать, что границам видимого света соответствуют длины волн 400 и 700 нм.

3.175. Решетка, имеющая 3200 штрихов на 1 см, освещается нормально падающим белым светом. Спектр получается на экране, отстоящем на 30 см от решетки. В экране вырезано квадратное отверстие со стороной 1 см, причем внутренний край квадрата отстоит на 5 см от центрального максимума. Какой интервал длин волн проходит через отверстие в экране?

3.176. Свет ( $\lambda = 600$  нм) падает нормально на дифракционную решетку. Двум соседним главным максимумами соответствуют углы дифракции, для которых  $\sin \varphi_1 = 0,2$  и  $\sin \varphi_2 = 0,3$ . Спектр четвертого по-

рядка отсутствует. Каковы постоянная решетки  $d$  и ширина щели  $b$ ? Перечислите все порядки спектральных линий, присутствующих на экране при найденных значениях  $d$  и  $b$ .

### Дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки

**3.177.** Две дифракционные решетки имеют одинаковую длину, но разное число штрихов. Как отличаются у этих решеток дисперсии, разрешающие способности? Какая из них дает более узкие спектральные линии?

**3.178.** Пусть в дифракционном спектрометре наблюдаются две близкие линии  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  одинаковой интенсивности. Изобразите зависимость интенсивности этих линий от  $\sin \varphi$  в спектре первого порядка в следующих случаях: а) линии хорошо разрешаются; б) линии разрешаются по критерию Рэлея; в) линии не разрешаются.

**3.179.** Изобразите зависимость от синуса угла дифракции  $\varphi$  интенсивности двух близких спектральных линий  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в спектре первого порядка для решеток: а) с одинаковыми дисперсиями и разными разрешающими способностями; б) с разными дисперсиями и одинаковыми разрешающими способностями.

**3.180.** Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть близко расположены друг к другу? Почему их число должно быть велико?

**3.181.** Дифракционная решетка имеет 20000 штрихов при ее полной ширине 4 см. Какой будет дисперсия у такой решетки для желтого натриевого пламени ( $\lambda = 589$  нм) в спектре первого и второго порядков?

**3.182.** Угловая дисперсия дифракционной решетки для излучения с длиной волны 668 нм в спектре первого порядка равна  $2,02 \cdot 10^5$  рад/м. Найдите период дифракционной решетки.

**3.183.** Найдите линейную дисперсию дифракционной решетки (см. задачу 3.182), если фокусное расстояние линзы, проецирующей спектр на экран, равно 40 см.

**3.184.** Определите для решетки, имеющей 3937 штрихов на 1 см: а) угловую дисперсию в спектре первого порядка; б) линейную дисперсию спектрографа при объективе с фокусным расстоянием 50 см; в) величину, обратную линейной дисперсии. Считать, что углы дифракции  $\varphi$  малы ( $\cos \varphi \approx 1$ ).

**3.185.** Какое расстояние между компонентами желтой линии дублета натрия ( $\lambda_1 = 589$  нм,  $\lambda_2 = 589,6$  нм) получится на фотографическом негативе в спектрографе (см. задачу 3.184)?

**3.186.** Определите, каким должно быть минимальное число штрихов у дифракционной решетки, чтобы с ее помощью можно было видеть раздельно желтые линии в спектре паров натрия, если длины волн этих линий  $\lambda_1 = 589$  нм,  $\lambda_2 = 589,6$  нм.

**3.187.** В гониометре ГС5 используется дифракционная решетка, имеющая 600 штрихов на 1 мм длины. На каком расстоянии друг от друга будут находиться в фокальной плоскости объектива гониометра с такой решеткой две желтые линии излучения ртутной лампы ( $\lambda_1 = 577$  нм,  $\lambda_2 = 589,6$  нм) в спектре первого порядка, если фокусное расстояние объектива зрительной трубы гониометра 27,3 см?

**3.188.** Определите угловое расстояние  $\Delta\varphi$  между главным максимумом и ближайшим к нему добавочным минимумом дифракционной решетки с периодом  $d$  и числом щелей  $N$ . (Удвоенное значение этой величины определяет угловую ширину спектральной линии в спектре, даваемом дифракционной решеткой.) Длина волны света  $\lambda$ .

**3.189.** Вычислите угловую ширину спектральных линий желтого дублета натрия ( $\lambda_1 = 589$  нм,  $\lambda_2 = 589,6$  нм) для дифракционной решетки, рассмотренной в задаче 3.181. Будут ли разрешаться эти линии в спектрографе с такой решеткой?

**3.190.** Длины волн спектральных линий обычно измеряют с точностью 0,0001 нм при помощи спектрографов, разрешающая способность которых составляет 0,001 нм. Почему это возможно?

**3.191.** Найдите разрешающую способность  $A$  решетки шириной 4 см периодом 2 мкм в спектре первого порядка, если длина волны света 500 нм. Чему равна максимальная разрешающая способность такой решетки?

**3.192.** Дифракционная решетка шириной 3 см содержит 4000 штрихов на 1 см. Каким может быть минимальный интервал  $\Delta\lambda$  между двумя спектральными линиями, чтобы они были разрешены в спектре первого порядка, если  $\lambda = 589$  нм? Может ли быть повышена разрешающая способность этой решетки для данной длины волны?

## 3.5. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

### Прямолинейность распространения света

**3.193.** В каких случаях можно пользоваться представлениями о световом луче?

**3.194.** Иногда мы наблюдаем полные, а иногда кольцеобразные затмения Солнца. Начертив схему расположения Земли, Луны и Солнца, объясните, почему возможны оба вида солнечных затмений.

**3.195.** Если вы видите глаза другого наблюдателя через сложную систему зеркал, сможет ли он, в свою очередь, видеть ваши глаза?

**3.196.** В какой среде лучи света могут быть криволинейными?

**3.197.** Заходящее Солнце кажется расположенным выше, чем на самом деле. Как это объяснить? Поясните ответ рисунком.

**3.198.** Искусственный спутник Земли можно иногда долго наблюдать после захода Солнца в виде движущейся ярко светящейся точки. Какова должна быть наименьшая высота спутника, обращающегося по круговой орбите в плоскости экватора, чтобы он был виден на экваторе прямо над головой через 2 ч после захода Солнца? Оцените, какую долю периода обращения  $T$  этого спутника составляет время  $t$ , в течение которого спутник можно наблюдать при его движении от горизонта до зенита; выразите также время  $t$  в минутах.

**3.199.** Помня, что Луна видна в отраженном свете, объясните: а) почему, если Луна восходит на востоке в полночь, не может быть полнолуния? б) почему молодой месяц не может быть долго виден после наступления темноты? (Нарисуйте схемы расположения Солнца, Земли и Луны в ее различных фазах.)

**3.200.** Диаметр фотосферы Солнца равен 1390000 км, расстояние Солнца от Земли составляет в среднем 150000000 км и меняется незначительно. Расстояние от центра Луны до поверхности Земли меняется от 357000 до 399000 км. Когда солнечное затмение бывает полным и когда кольцеобразным, если диаметр Луны равен 3480 км?

**3.201.** Впервые общий принцип геометрической оптики был сформулирован французским математиком и физиком П.Ферма примерно в 1662 г. и получил название принципа Ферма. Согласно этому принципу из всех возможных путей, соединяющих две точки, свет выбирает тот путь, для прохождения которого требуется наименьшее время. Получите с помощью принципа Ферма законы отражения и преломления света.

### **Отражение и преломление света на плоской границе раздела сред**

**3.202.** Определите разность хода параллельных лучей, отражающихся от плоского зеркала.

**3.203.** В обычном плоском зеркале наше изображение оказывается перевернутым справа налево, т.е. изображение правой руки выглядит так, как левая рука «человека» в зеркале. Почему зеркало не переворачивает все еще «вверх ногами»? Что действительно переворачивается зеркалом?

**3.204.** Учитывая, что показатель преломления алмаза равен 2,42, а стекла – 1,5, объясните, почему бриллиант блестит больше, чем его имитация из стекла при той же огранке.

**3.205.** В воде идут два параллельных луча 1 и 2 (рис. 3.17). Луч 1 выходит в воздух непосредственно из воды, а луч 2 проходит сквозь горизонтальную плоскопараллельную стеклянную пластинку. Будут ли лучи 1 и 2 параллельны по выходе в воздух? Выйдет ли в воздух луч 2, если луч 1 испытывает полное отражение?

**3.206.** Широкий параллельный пучок света, спектр которого содержит две длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , распространяется в некоторой жидкости с показателем преломления  $n_{ж}$ . Как отделить лучи разных длин волн с помощью тонкой прозрачной плоскопараллельной пластинки, если показатель преломления вещества пластинки меньше, чем  $n_{ж}$ , и его значения различны для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ?

**3.207.** Плоское зеркало  $Z$  и некоторый предмет  $AB$  расположены так, как показано на рисунке 3.18. Где должен располагаться глаз наблюдателя, чтобы предмет был виден целиком?

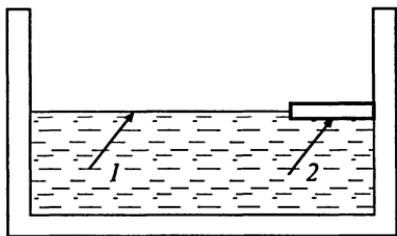


Рис. 3.17

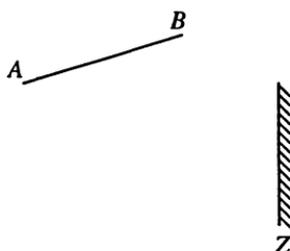


Рис. 3.18

**3.208.** На рисунке 3.19, *а, б, в* параллельный пучок монохроматического света входит в каждый ящик слева. Что должно быть расположено в каждом ящике, чтобы выходящие пучки имели вид, показанный на рисунке? Одна и две стрелки на выходящих лучах соответствуют крайним лучам входящего пучка.

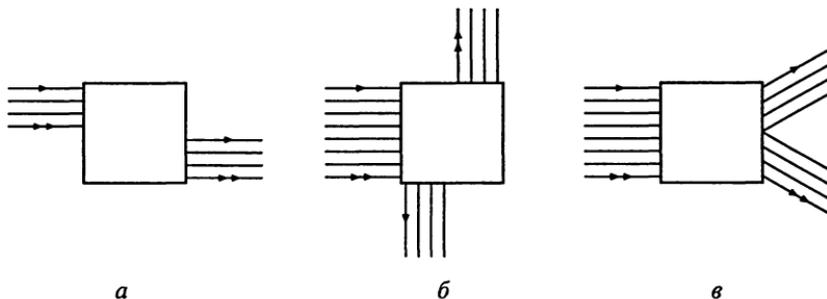


Рис. 3.19

**3.209.** В магазинах готовой одежды нередко имеются зеркала, достигающие до самого пола, для того, чтобы покупатель мог видеть себя во весь рост. Обязательна ли для этого такая высота зеркала? Если самый низкорослый покупатель имеет рост около 150 см, то до какой высоты от пола можно поднять нижний край зеркала для того, чтобы все покупатели могли видеть в зеркале свою обувь?

**3.210.** Небольшой предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, поставленными друг к другу под углом  $\alpha = 32^\circ$  на расстоянии  $r = 10$  см от линии пересечения зеркал ближе к одному из зеркал. На каком расстоянии  $x$  друг от друга находятся первые мнимые изображения предмета в зеркалах? Как сместится середина отрезка прямой, соединяющей два изображения предмета, если предмет сдвинуть на  $l = 2$  см так, чтобы его расстояние от линии пересечения зеркал осталось неизменным?

**3.211.** Параллельный пучок света падает на одно из зеркал, составляющих двугранный угол  $20^\circ$ , параллельно плоскости, делящей угол пополам, под прямым углом к линии пересечения зеркал. Как он идет дальше? Каков будет световой поток по выходе пучка из двугранного угла, если световой поток на входе равен 600 лм и если при каждом отражении световой поток уменьшается в 2 раза?

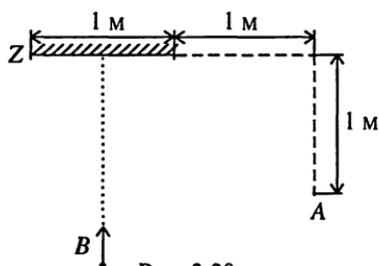


Рис. 3.20

**3.212.** Сбоку от зеркала  $Z$  (рис. 3.20) стоит человек  $A$ ; второй человек  $B$  приближается к зеркалу по перпендикуляру, проходящему через середину зеркала. На каком расстоянии от зеркала будет находиться человек  $B$  в тот момент, когда оба человека смогут увидеть друг друга в зеркале?

**3.213.** Три плоских зеркала расположены взаимно перпендикулярно.

Покажите, что луч, упавший под произвольным углом на одно из зеркал и отразившийся на второе, а затем на третье зеркало, после трех отражений идет антипараллельно прежнему направлению.

**3.214.** Высота Солнца над горизонтом равна  $20^\circ$ . Человек, стоя на берегу пруда, с помощью плоского зеркала пускает зайчик в воду. Как надо расположить зеркало, чтобы отраженный от него луч шел в воде под углом  $60^\circ$  к горизонту?

**3.215.** Пучок света падает на поверхность стола под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Под каким углом  $\beta$  к горизонту надо поместить плоское зеркало, чтобы после отражения от него пучок света был параллелен поверхности стола?

**3.216.** Человек смотрит на свое изображение в зеркале, положенном на дно сосуда, наполненного водой. На какое расстояние аккомодирован глаз человека, если он находится на высоте 10 см над уровнем воды, а зеркало – на глубине 8 см под уровнем воды?

**3.217.** Определите минимальную ширину нижнего зеркала перископа, при которой в нем будет видно полностью верхнее зеркало, если ширина верхнего зеркала равна 10 см, расстояние между верхним и нижним зеркалами равно 75 см и глаз находится на расстоянии 25 см от нижнего зеркала.

**3.218.** Предмет высотой  $h = 0,5$  м находится на расстоянии  $s_1 = 2$  м от плоского зеркала. Какова должна быть минимальная высота плоского зеркала, чтобы человек, находящийся на расстоянии  $s_2 = 5$  м от зеркала, мог бы видеть этот предмет полностью, если предмет расположен параллельно зеркалу?

**3.219.** Водолаз, находящийся на дне моря на глубине  $h = 6$  м, смотрит вверх и видит изображение камней, лежащих на дне моря. Определите, на каком минимальном расстоянии  $s$  от него лежат на дне видимые им камни.

**3.220.** Параллельный пучок света проходит сквозь несколько прозрачных плоскопараллельных пластин. При каждом преломлении теряется 0,1 часть светового потока; внутри каждой пластины поглощается 0,2 светового потока. Каким будет световой поток, прошедший сквозь 5 пластин, если начальный световой поток равен 500 лм?

**3.221.** Для определения показателя преломления жидкости на дно сосуда положили линейку с делениями. Две щели, через которые рассматривают деления на линейке, при отсутствии жидкости в сосуде расположены так, что через них видно нулевое деление линейки (рис. 3.21). При заполнении сосуда слоем исследуемой жидкости высотой 10 см через щели, если смотреть в том же направлении, видно деление, соответствующее 8,6 см. Направление, под которым рассматриваются деления на линейке через щели, образует с поверхностью воды угол, равный  $30^\circ$ . Пользуясь этими данными, определите показатель преломления жидкости.

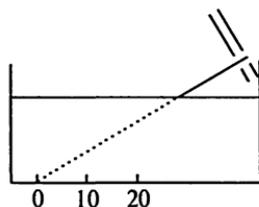


Рис. 3.21

**3.222.** Свая, вбитая в дно реки, выступает из воды на 0,5 м. Определите длину тени сваи на дне реки в солнечный день, если лучи Солнца падают на поверхность воды под углом  $60^\circ$  и глубина реки в окрестности сваи 0,5 м.

**3.223.** Луч света падает под углом  $\alpha$  на плоскую границу среды с показателем преломления  $n$ . Как должны быть связаны между собой  $\alpha$  и  $n$ , чтобы отраженный луч был перпендикулярен к преломленному?

**3.224.** Ныряльщик видит Солнце из воды на угловом расстоянии  $30^\circ$  от зенита. На какой высоте над горизонтом находится Солнце?

**3.225.** Сероуглерод налит в широкий сосуд до высоты 10 см, считая от дна. В центре дна сосуда помещен источник света небольших размеров. Найдите площадь поверхности сероуглерода, через которую свет выходит в воздух.

**3.226.** На поверхность стеклянной пластинки помещена капля прозрачной жидкости (рис. 3.22). Как, используя явление полного отражения, можно было бы экспериментально определить показатели преломления жидкости и стекла?

**3.227.** Цилиндрический стакан с жидкостью поставлен на монету (рис. 3.23), рассматриваемую сквозь боковую стенку стакана. Укажите наименьшее возможное значение показателя преломления жидкости, при котором монета не видна.

**3.228.** Между светящейся точкой и глазом помещают прозрачную плоскопараллельную пластинку. Как рассчитать кажущееся приближение светящейся точки к наблюдателю, производимое пластинкой, если луч зрения нормален к ее поверхности?

**3.229.** Под стеклянной пластинкой толщиной  $d = 13$  см лежит маленькая крупинка. На каком расстоянии  $l$  от верхней поверхности пластинки образуется ее видимое изображение, если луч зрения перпендикулярен к поверхности пластинки, а показатель преломления стекла  $n = 1,5$ ?

**3.230.** Предмет находится на расстоянии  $l_1 = 15$  см от плоскопараллельной стеклянной пластинки. Наблюдатель рассматривает его через пластинку, причем луч зрения нормален к ней. Определите, на каком расстоянии  $l_2$  от ближайшей к наблюдателю поверхности пластинки находится изображение предмета. Показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

**3.231.** Для определения показателя преломления  $n$  тонких прозрачных пластинок микроскоп устанавливают так, чтобы отчетливо был виден какой-либо объект  $A$ . Затем между объектом и объективом микроскопа  $O$  помещают испытываемую пластинку толщиной  $d$  (рис. 3.24). Тубус микроскопа поднимают на некоторую высоту  $\Delta$ , чтобы вновь отчетливо видеть объект, который теперь кажется находящимся в точке  $A'$ . Докажите, что  $n = d/(d - \Delta)$ .

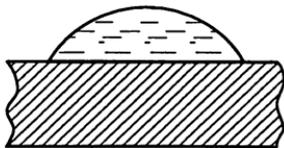


Рис. 3.22

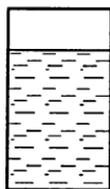


Рис. 3.23

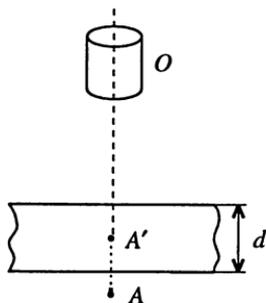


Рис. 3.24

**3.232.** Модификацией метода определения показателя преломления, описанного в задаче 3.231, является следующий. На верхнюю сторону плоскопараллельной пластинки наносят небольшое пятно, на которое и наводят микроскоп. Затем тубус микроскопа опускают на

такое расстояние  $\Delta$ , чтобы в микроскоп было видно зеркальное изображение пятна от нижней поверхности пластинки. Получите формулу для расчета  $n$  в этом методе, если толщина пластинки равна  $d$ .

**3.233.** Плоскую стеклянную пластинку толщиной 3 мм рассматривают в микроскоп. Сначала микроскоп устанавливают для наблюдения верхней поверхности пластинки, а затем смещают тубус микроскопа вниз до тех пор, пока не будет отчетливо видна нижняя поверхность пластинки (для удобства наблюдения на поверхностях пластинки сделаны метки). Смещение тубуса оказалось равным 2 мм. Найдите показатель преломления стекла.

**3.234.** Каков преломляющий угол у стеклянной призмы, если угол наименьшего отклонения равен преломляющему углу? Какой показатель преломления должно иметь вещество, из которого сделана призма, чтобы это условие могло быть выполнено?

**3.235.** Полая стеклянная равноугольная призма находится в воде. Определите угол наибольшего отклонения. Поясните решение чертёжом.

**3.236.** Призма с преломляющим углом  $48^\circ$  дает в воздухе угол наименьшего отклонения  $31^\circ$ . На сколько изменится угол наименьшего отклонения, если эту призму поместить в воду? Показатель преломления воды  $n = 1,33$ .

**3.237.** Для получения посредством проекционного аппарата проекций в прямом, а не в перевернутом виде, применяют «оборотную призму», преломляющий угол которой равен  $90^\circ$ . Начертите, как идут в призме и за ней два луча, падающие на призму параллельно стороне  $AB$  (рис. 3.25). Изменится ли расстояние между лучами? Одинаковы ли длины первого и второго лучей внутри стекла?

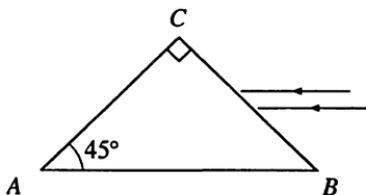


Рис. 3.25

**3.238.** В каких пределах может изменяться угол отклонения  $\varphi$ , который может дать стеклянная призма с преломляющим углом  $60^\circ$ ?

**3.239.** Гало, т.е. светлые слабо окрашенные круги вокруг Солнца (или Луны), наблюдаются тогда, когда небо покрыто тонкой пленкой перисто-слоистых или высоких слоистых облаков. Гало образуются вследствие преломления световых лучей в беспорядочно ориентированных ледяных кристаллах, имеющих форму правильных шестиугольных призм. Угловые радиусы кругов гало, приблизительно равные  $22^\circ$  и  $46^\circ$ , соответствуют углам наименьшего отклонения лучей, идущих от Солнца. Какие грани в ледяных призмах образуют преломляющие углы, соответствующие этим кругам? Опишите характер распределения окраски в гало.

## Отражение и преломление света на сферической границе раздела сред. Сферические зеркала и линзы

**3.240.** Тонкую плоскопараллельную стеклянную пластину разрежьте на две части, так что граница раздела между ними является элементом сферической поверхности радиусом  $R$  (рис. 3.26). Каковы фокусные расстояния  $f$  образовавшихся линз, если показатель преломления стекла  $n$ ?

**3.241.** Являются ли одинаковыми переднее и заднее фокусные расстояния хрусталика глаза?

**3.242.** Что следует называть изображением точечного источника с позиций волновой теории света?

**3.243.** В каких случаях получаются действительные изображения, а в каких – мнимые? При каких условиях изображение переносится в бесконечность?

**3.244.** Постройте график зависимости координаты точки изображения от координаты точечного источника для тонкой собирающей (рассеивающей) линзы. Начало координат выбрать в оптическом центре линзы, ось  $X$  направить вдоль луча света. За единицу длины примите фокусное расстояние  $f$  линзы.

**3.245.** Чему равно наименьшее расстояние  $l_{\min}$  между предметом и действительным изображением, образуемым собирающей линзой? Постройте график зависимости расстояния  $l$  между предметом и его действительным изображением в линзе от расстояния  $a$  между предметом и линзой.

**3.246.** В чем состоит физический смысл понятия оптической силы линзы? Как изменится оптическая сила стеклянной двояковыпуклой линзы, если из воздуха ее перенести в воду? в сероуглерод? (Показатель преломления сероуглерода  $n = 1,63$ ).

**3.247.** На систему (см. задачу 3.240) направили параллельный пучок света. Как будет меняться характер пучка на выходе, если линзы раздвигать, меняя расстояние  $l$  между ними от нуля до  $l > f$ ? Рассмотрите случаи, когда свет падает со стороны собирающей линзы (рис. 3.27, а) и со стороны рассеивающей линзы (рис. 3.27, б).

**3.248.** Нарушение каких предположений теории идеальных оптических систем выявляет наличие сферической абберрации? хроматической абберрации? астигматизма?

**3.249.** Возможна ли абсолютная стигматичность изображения в системе, свободной от абберраций? Чем ограничен размер изображения точечного источника?

**3.250.** Может ли яркость изображения объекта в какой-либо оптической системе превышать яркость самого объекта?

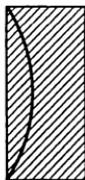
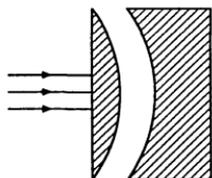
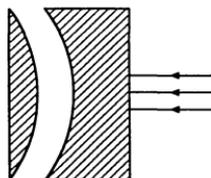


Рис. 3.26



*a*

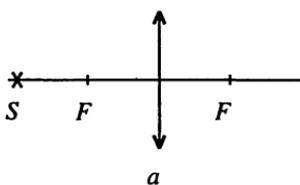


*б*

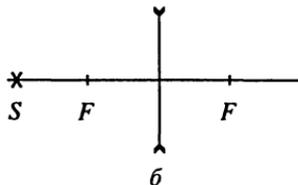
Рис. 3.27

3.251. С помощью собирающей линзы на экране получают изображение свечи. Как изменится это изображение, если половину линзы закрыть непрозрачным экраном?

3.252. Постройте (двумя способами) изображение точечного источника в собирающей (рис. 3.28, *a*) и рассеивающей (рис. 3.28, *б*) линзах.



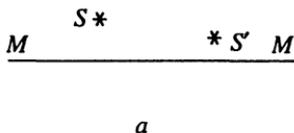
*a*



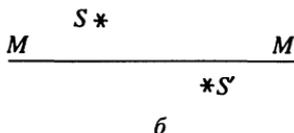
*б*

Рис. 3.28

3.253. На рисунке 3.29, *a*, *б* показаны положения оси *MM* сферического зеркала, светящейся точки *S* и ее изображения *S'*. Найдите построением положения вершины зеркала и его центра.



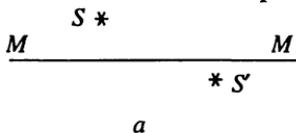
*a*



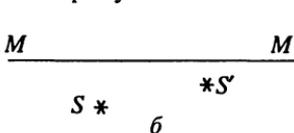
*б*

Рис. 3.29

3.254. На рисунке 3.30, *a*, *б* показаны положения оптической оси *MM* тонкой линзы, светящейся точки *S* и ее изображения *S'*. Найдите построением положения центра линзы и ее фокусов.



*a*



*б*

Рис. 3.30

3.255. На рисунке 3.31 показаны положения оптической оси тонкой линзы и ход проходящего сквозь нее луча  $ABC$ . Найдите построением ход произвольного луча  $DE$  за линзой.

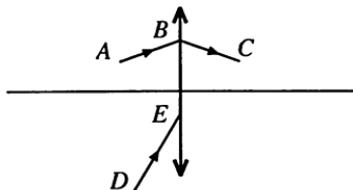


Рис. 3.31

3.256. Найдите построением направление луча 2 после отражения его от зеркала, если известен ход луча 1 (рис. 3.32, а, б).

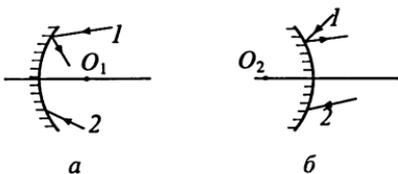


Рис. 3.32

3.257. Восстановите падающий луч по известному преломленному (рис. 3.33, а – з). Построение выполните двумя способами.

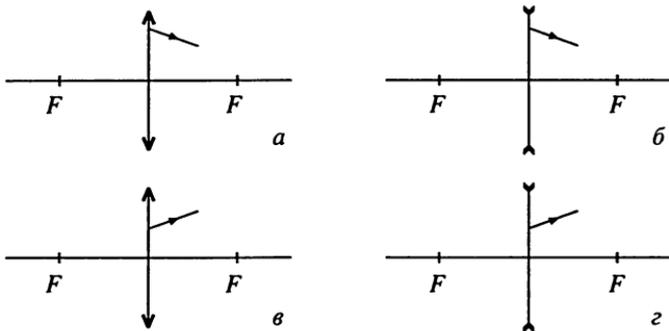


Рис. 3.33

3.258. Постройте (двумя способами) преломленный луч (рис. 3.34, а – з).

3.259. Выпуклые зеркала часто используются в качестве зеркал заднего обзора на автомашинах. Сделав соответствующие построения, докажите, что площадь, обозреваемая глазом, благодаря отраже-

нию на круглом выпуклом зеркале больше, чем площадь, обозреваемая с помощью плоского зеркала того же диаметра при том же расположении зеркала и глаза.

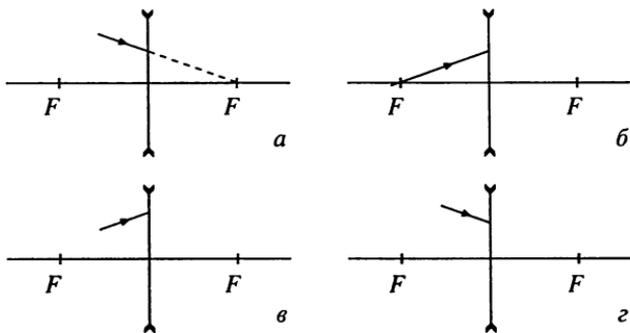


Рис. 3.34

**3.260.** На рисунке 3.35 *а – в* параллельный пучок монохроматического света входит в ящики слева. Какие оптические системы надо поместить в ящики, чтобы выходные пучки имели вид, показанный на рисунке? Одна и две стрелки на выходящих лучах соответствуют крайним лучам входящего пучка.

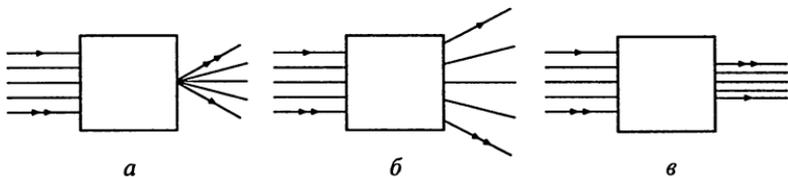


Рис. 3.35

**3.261.** Луч света падает на вогнутое сферическое зеркало радиусом  $R$  параллельно оптической оси  $OO'$  на расстоянии  $a$  от нее (рис. 3.36) и после отражения пересекает оптическую ось  $OO'$  в точке  $B$ . Найдите соотношение между  $a$  и  $R$ , при котором относительная ошибка, которую мы делаем, принимая  $OB = 0,5 R$ , равна 1%.

**3.262.** На тонкостенную сферическую колбу, наполненную жидкостью, падает нормально параллельный пучок лучей света, диаметр сечения которого значительно меньше диаметра колбы (рис. 3.37). На противоположной стороне колбы пучок света освещает кружок, диаметр которого в два раза меньше диаметра пучка, падающего на колбу. Определите показатель преломления жидкости.

**3.263.** Горизонтально расположенное вогнутое зеркало  $MN$  заполнено водой (рис. 3.38). Радиус зеркала  $R = 60$  см. Каково фокусное рас-

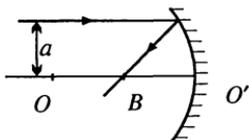


Рис. 3.36

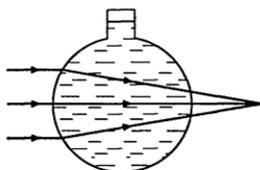


Рис. 3.37

стояние такой системы? Наибольшая глубина воды в зеркале мала по сравнению с радиусом сферы.

**3.264.** На рисунке 3.39 изображены источник света  $S$  и его изображение  $S'$ , даваемое линзой  $ABC$ .  $SC = S'C = 1$  м,  $AC = BC = 0,1$  м и линза имеет на краях толщину 3 мм. Луч света проходит расстояние  $SCS'$  за то же время, что и расстояния  $SAS'$  и  $SBS'$ . Определите толщину линзы в середине (в сечении, проходящем через точку  $C$ ). Показатель преломления стекла 1,5.

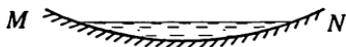


Рис. 3.38

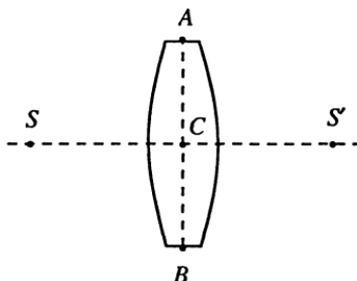


Рис. 3.39

**3.265.** Очки с какой оптической силой необходимы: а) близорукому человеку, у которого расстояние наилучшего зрения равно 10 см; б) дальнозоркому человеку, у которого расстояние наилучшего зрения 40 см?

**3.266.** Как расположить собирающую линзу и сферическое вогнутое зеркало, чтобы лучи света, идущие от точечного источника, находящегося на общей оптической оси линзы и зеркала, создали изображение источника в том же месте, где находится сам источник?

**3.267.** Каков радиус кривизны вогнутого сферического зеркала, если изображение предмета, находящегося на расстоянии 15 см от зеркала, получается увеличенным в два раза?

**3.268.** Радиус кривизны вогнутого зеркала 40 см. Найдите положение объекта, при котором его изображение получается действительным и увеличенным в два раза. Найдите такое положение объекта, при котором изображение будет мнимым и увеличенным в два раза.

**3.269.** Для измерения фокусного расстояния зеркала в 10 см от него поместили зажженную свечу. Четкое изображение свечи получилось на экране, расположенном на расстоянии 30 см от зеркала. Найдите фокусное расстояние зеркала.

**3.270.** Предмет находится на расстоянии 20 см от вершины вогнутого сферического зеркала на главной оптической оси; его изображение получилось на расстоянии 40 см от зеркала. На какое расстояние и в каком направлении сместится изображение, если предмет сместить на 10 см по направлению к зеркалу?

**3.271.** Луч света падает на однородный прозрачный шар. Проходя внутри шара, он достигает границы раздела шар – воздух. Может ли в этой точке произойти полное отражение?

**3.272.** На экране, отстоящем от объектива (тонкая линза с оптической силой 5 дптр) на расстоянии 4 м, получено четкое изображение диапозитива. Экран отодвигают на 20 см. На сколько надо переместить диапозитив, чтобы восстановить четкость изображения?

**3.273.** С помощью тонкой собирающей стеклянной линзы с показателем преломления  $n = 1,5$  получено действительное изображение предмета на расстоянии 10 см от линзы. После того как предмет и линзу погрузили в воду, не изменяя расстояния между ними, изображение получилось на расстоянии 60 см от линзы. Определите фокусное расстояние линзы.

**3.274.** Собирающая линза дает изображение некоторого объекта на экране. Высота изображения равна  $a$ . Оставляя неподвижным экран, начинают двигать линзу к экрану и находят, что при втором четком изображении объекта высота изображения равна  $b$ . Найдите высоту предмета  $h$ .

**3.275.** Фокусное расстояние линзы  $f$  считается равным расстоянию от нее до изображения очень далекой лампы. Каково должно быть расстояние  $l$  лампы до линзы, чтобы ошибка в определении фокусного расстояния не превышала  $p\%$ ?

**3.276.** Светящийся предмет и экран находятся на расстоянии  $L$  друг от друга. Если между предметом и экраном перемещать тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием  $f$ , то действительное изображение предмета на экране получается при двух положениях линзы, отстоящих на расстоянии  $l$  друг от друга. Докажите, что  $l = \sqrt{L(L - 4f)}$ .

Каковы увеличения, даваемые линзой в обоих случаях?

**3.277.** Двояковыпуклая линза, ограниченная сферическими поверхностями одинакового радиуса, поставлена на таком расстоянии от предмета, что изображение на экране получилось в  $k$  раз больше предмета. Определите расстояние от предмета до экрана, если: а)  $k = 1$ ; б)  $k = 20$ ; в)  $k = 0,2$ . Показатель преломления материала линзы 1,5; радиус кривизны линзы 12 см.

**3.278.** Экран находится на расстоянии  $a = 100$  см от свечи. Помещая между свечой и экраном собирающую тонкую линзу, можно получить изображение свечи на экране при двух положениях линзы, отстоящих друг от друга на расстоянии  $b = 20$  см. Во сколько раз отличаются яркости изображения свечи?

**3.279.** Точечный источник света находится на расстоянии 95 см от экрана. На каком расстоянии от источника света следует поместить линзу с фокусным расстоянием 16 см и диаметром оправы 10 см, чтобы получить на экране ярко освещенный кружок диаметром 2,5 см? Поясните ответ чертежом.

**3.280.** Солнечные лучи, падая нормально на экран, создают на нем освещенность  $10^4$  лк. Перед экраном помещают: а) тонкую линзу с оптической силой +5 дптр на расстоянии 60 см; б) линзу с оптической силой  $-2$  дптр на расстоянии 20 см. Определите в обоих случаях среднюю освещенность экрана в тени от линзы и в светлом кольце вокруг тени. Потерями энергии в линзе пренебречь.

**3.281.** Солнце освещает бумагу. Как изменится освещенность бумаги, если на ней при помощи тонкой линзы с оптической силой 4 дптр и с диаметром отверстия 5 см получить изображение Солнца?

**3.282.** С помощью собирающей линзы диаметром  $d$  с фокусным расстоянием  $f$  получают изображение Солнца. Покажите, что освещенность изображения пропорциональна  $(dlf)^2$ . (Отношение  $(dlf)^2$  называют светосилой линзы.)

**3.283.** Найдите фокусные расстояния для красных, желтых и синих лучей, а также продольную хроматическую аберрацию (разность фокусных расстояний для крайних видимых лучей) двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны  $R_1 = R_2 = R = 981,4$  мм, сделанной из стекла со следующими показателями преломления:

Лучи	$\lambda$ , нм	$n$
Красные	668,2	1,4835
Желтые	527,0	1,4907
Синие	404,6	1,4997

**3.284.** При визуальных наблюдениях мы фиксируем изображение, образованное лучами средней части видимого спектра, т.е. желтыми лучами. Считая, что диаметр отверстия линзы (см. задачу 3.283) равен 5 см, найдите диаметр  $D$  кругов рассеяния, образованных красными и синими лучами при фокусировке на желтое изображение.

### 3.6. ОПТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

**3.285.** Какое изображение дает лупа: действительное или мнимое? Любая ли собирающая линза может быть использована в качестве лупы?

**3.286.** Покажите построением, что любые два луча, исходящие из произвольной точки объекта, расположенного в фокальной плоскости лупы, будут на выходе из лупы параллельны друг другу.

**3.287.** От каких параметров микроскопа зависит его увеличение? Каков порядок значений фокусных расстояний объектива и окуляра?

**3.288.** Какие aberrации опасны для объектива микроскопа, а какие – для окуляра? Как они устраняются?

**3.289.** На рисунке 3.40, *a*, *б* изображена центрированная система из собирающей и рассеивающей линз. В каком из этих двух случаев линзы образуют телескопическую систему?

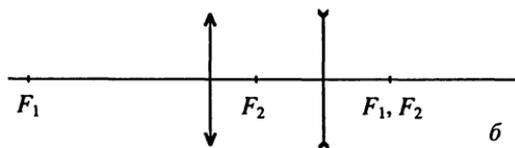
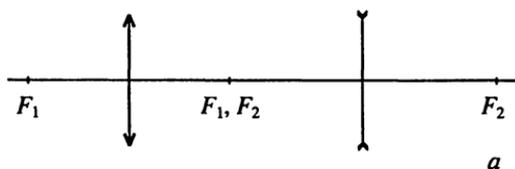


Рис. 3.40

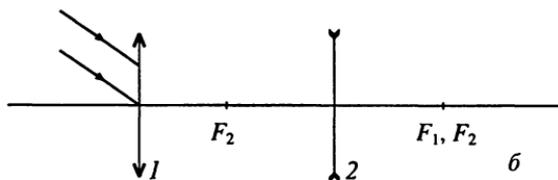
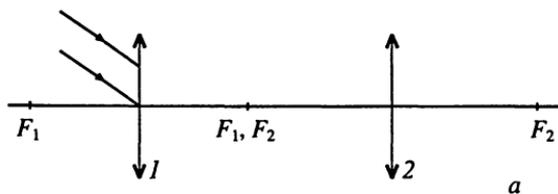


Рис. 3.41

**3.290.** Какова оптическая сила телескопической системы? От чего зависит увеличение телескопа?

**3.291.** Покажите построением, что два произвольных параллельных луча, входящих в телескопическую систему из двух линз (рис. 3.41, *a, б*), на выходе из системы также будут параллельными.

**3.292.** Обладает ли какими-нибудь преимуществами перед нормальным близорукий глаз, дальнозоркий глаз?

**3.293.** Фотографируется сначала ближний предмет, потом – дальний. Куда надо переместить объектив фотоаппарата?

**3.294.** Удаленный предмет фотографируют несколькими фотоаппаратами, объективы которых имеют разные фокусные расстояния. Какой из них даст наибольший размер изображения на фотопленке?

**3.295.** Каков по порядку величины размер объектов, неразличимых при наблюдении в микроскоп? Как можно повысить разрешающую способность микроскопа?

**3.296.** В лучших современных телескопах (рефлекторах) применяются зеркала диаметром 5–6 м. В чем смысл использования телескопов больших диаметров?

**3.297.** Почему при ярком освещении острота зрения повышается?

**3.298.** Диаметр зрачка человеческого глаза может меняться от 2 до 8 мм. Чем объяснить, что максимальная острота зрения имеет место при диаметре зрачка 3–4 мм?

**3.299.** Звезды нередко фотографируют через синий светофильтр. В чем преимущество такого приема?

**3.300.** Диапозитив имеет размер 8 x 8 см. Определите оптическую силу тонкой собирающей линзы, которая может служить объективом проекционного аппарата, если изображение диапозитива на экране должно иметь размер 1,2x1,2 м. Расстояние от объектива до экрана равно 4 м.

**3.301.** С помощью проекционного аппарата, объектив которого имеет фокусное расстояние 20,6 см и диаметр 4 см, получили на экране изображение диапозитива, размер которого 8,5x8,5 см. Диапозитив находится на расстоянии 23 см от объектива. Определите минимальный размер экрана, на котором поместилось бы полностью изображение диапозитива, и постройте это изображение. Найдите минимальный диаметр и фокусное расстояние конденсора этого проекционного аппарата, если источником света служит электрическая лампа с вольфрамовой спиралью, согнутой в виде окружности диаметром 1,5 см. При решении задачи учесть, что конденсор устанавливается так, что он дает изображение источника на самом объективе, а размеры конденсора выбираются так, чтобы свет, выходящий из конденсора, покрывал полностью стоящий рядом с ним диапозитив.

**3.302.** Размеры изображения предмета при фотографировании вдвое меньше размеров самого предмета. Как изменится освещенность

изображения предмета при съемке в тех же условиях, если размеры изображения будут вчетверо меньше размеров предмета?

**3.303.** Требуется сфотографировать чертеж размером  $50 \times 75$  см с помощью объектива, фокусное расстояние которого равно  $15$  см. На каком расстоянии от объектива следует поместить чертеж, чтобы изображение на фотопластинке имело размер  $10 \times 15$  см?

**3.304.** Картину размером  $2 \times 2$  м снимают фотоаппаратом, установленным от нее на расстоянии  $4,5$  м. Изображение получилось размером  $5 \times 5$  см. Чему равно фокусное расстояние объектива аппарата? Расстояние от картины до объектива считать большим по сравнению с фокусным расстоянием.

**3.305.** При фотографировании обратной стороны Луны межпланетной станцией были применены два объектива с фокусными расстояниями  $20$  и  $50$  см. Какого размера должно было получиться изображение Луны на фотопленке для каждого объектива? Расстояние от центра Луны до межпланетной станции при фотографировании принять равным  $67\,000$  км.

**3.306.** Как сместится фокус фотоаппарата, если внутри аппарата на пути лучей (перпендикулярно к оптической оси) поместить плоскопараллельную стеклянную пластинку толщиной  $d = 6$  мм с показателем преломления  $n = 1,5$ ? Объектив сильно задиафрагмирован.

**3.307.** Матовое стекло фотографического аппарата установлено так, что резким получается изображение предмета, находящегося на расстоянии  $5$  м. До какого диаметра нужно задиафрагмировать объектив с фокусным расстоянием  $20$  см, чтобы не было заметно нерезкости в изображении предметов, находящихся на  $0,5$  м ближе снимаемого (нерезкость считать незаметной, если размытость деталей не превышает  $0,1$  мм)?

**3.308.** Начертите примерный ход лучей от некоторой точки предмета до ее изображения на сетчатке глаза, аккомодированного на бесконечность и вооруженного: а) лупой; б) микроскопом; в) трубой Кеплера; г) трубой Галилея.

**3.309.** Найдите увеличение, даваемое лупой, фокусное расстояние которой равно  $2$  см: а) для нормального глаза с расстоянием наилучшего зрения  $25$  см; б) для близорукого глаза с расстоянием наилучшего зрения  $15$  см.

**3.310.** На каком максимальном расстоянии близорукий человек может читать без очков мелкий шрифт, если обычно он пользуется очками с оптической силой, равной  $-4$  дптр?

**3.311.** Каково фокусное расстояние  $2,5$ -кратной лупы? Какое увеличение дает эта лупа, если наблюдатель рассматривает сквозь нее свой зрачок, видимый в плоском зеркале? Глаз аккомодирован на бесконечность.

**3.312.** Человек рассматривает свой глаз, пользуясь вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 10 см. Глаз аккомодирован на бесконечность. Каково увеличение?

**3.313.** Зрительная труба с фокусным расстоянием объектива 50 см установлена на бесконечность. На какое расстояние надо передвинуть окуляр трубы, чтобы видеть предметы на расстоянии 50 м?

**3.314.** Окуляр микроскопа дает 5-кратное увеличение, объектив – 50-кратное. Определите увеличение микроскопа и фокусные расстояния объектива и окуляра, если расстояние между объективом и окуляром 18 см.

**3.315.** Оптические силы объектива и окуляра микроскопа равны соответственно 100 и 20 дптр. Увеличение микроскопа равно 50. Каким будет увеличение этого микроскопа, если расстояние между объективом и окуляром увеличить на 2 см?

**3.316.** Микроскоп состоит из объектива с фокусным расстоянием 5 мм и окуляра с фокусным расстоянием 50 мм. Рассматриваемый с помощью этого микроскопа предмет находится от объектива на расстоянии 5,2 мм. Расстояние наилучшего видения для наблюдателя 25 см. Определите длину тубуса микроскопа (расстояние от объектива до окуляра) и его линейное увеличение.

**3.317.** Две стеклянные линзы, находясь на некотором расстоянии в воздухе, образуют телескопическую систему. Как надо изменить расстояние между линзами, чтобы они образовали телескопическую систему, находясь в воде?

**3.318.** Фокусное расстояние объектива одного из рефракторов в Пулковке равно 14 м. Какое увеличение дает этот рефрактор, если фокусное расстояние окуляра 2,5 см?

**3.319.** Каждая трубка театрального бинокля состоит из собирающей линзы (объектив) и рассеивающей линзы (окуляр). Расстояние между линзами, которые можно считать тонкими, при аккомодации глаза на бесконечность, равно 5 см. Диаметр объектива 3,6 см, окуляра 1,2 см. Увеличение бинокля равно 2,5. 1. Каким будет увеличение бинокля, если посмотреть в его объектив, обратив окуляр к объекту? 2. Каковы оптические силы объектива и окуляра? 3. Что больше ограничивает пучок лучей, проходящих сквозь бинокль, оправы объектива или окуляра?

**3.320.** Труба Галилея 9-кратного увеличения имеет длину 40 см. После того как объектив и окуляр трубы заменили собирающими линзами, труба стала давать то же увеличение. Определите фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  этих линз, а также фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  объектива и окуляра галилеевой трубы.

**3.321.** Удаленный светящийся протяженный объект (например, Луну) наблюдают сначала невооруженным глазом, затем с помощью зрительной трубы с нормальным увеличением. Найдите отношение

освещенностей изображения объекта на сетчатке глаза. Потерями светового потока в зрительной трубе пренебречь.

**3.322.** Зрительную трубу кеплеровского типа с увеличением  $\Gamma = 15$  погрузили в воду, которая заполнила и ее внутреннюю часть. Чтобы система при тех же размерах опять стала телескопической, объектив заменили другим. Каково стало после этого увеличение трубы в воде? Показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

**3.323.** При наблюдении в телескоп с нормальным увеличением освещенность изображения звезды на сетчатке глаза в  $\alpha = 10$  раз меньше освещенности дневного неба, рассматриваемого в тот же телескоп. Во сколько раз надо увеличить диаметр объектива для того, чтобы освещенность изображения звезды на сетчатке стала в  $\beta = 10$  раз больше освещенности изображения неба, если вместе с объективом телескопа заменен и окуляр таким образом, что увеличение телескопа осталось нормальным?

**3.324.** В фокальной плоскости объектива телескопа помещена фотопластинка. Освещенность изображения звезды на фотопластинке в  $\alpha = 10$  раз меньше освещенности дневного неба. Во сколько раз надо увеличить диаметр объектива, чтобы освещенность изображения звезды на фотопластинке стала в  $\beta = 10$  раз больше освещенности изображения неба?

**3.325.** В созвездии Большой Медведицы находится двойная звезда, компоненты которой – Мицар (средняя звезда в ручке ковша) и Алькор (слабая звездочка рядом с Мицаром). Угловое расстояние между Мицаром и Алькором составляет  $11'48''$ . На каком расстоянии находятся изображения этих звезд на фотопластинке, если фотография получена с помощью рефрактора Пулковской обсерватории, фокусное расстояние объектива которого 14 м? Под каким углом видит это расстояние наблюдатель с нормальным зрением, рассматривающий фотопластинку?

**3.326.** Зрительная труба состоит из трех линз с фокусными расстояниями, соответственно равными 40, 3,5 и 4 см. Наблюдатель, для которого расстояние наилучшего видения 24 см, рассматривает через эту трубу мачту высотой 10 м, находящуюся на расстоянии 40 м. Глаз аккомодирован на бесконечность. Покажите на рисунке расположение линз в трубе. Определите длину этой зрительной трубы и угловой размер видимого изображения мачты. При решении задачи учесть, что средняя линза вставлена в трубу только для переворачивания изображения и никакого влияния на увеличение трубы не оказывает.

**3.327.** Из рефрактора, у которого объектив имеет диаметр 0,76 м и фокусное расстояние 14 м (телескоп Пулковской обсерватории), вынули окуляр и рассматривают изображение, получившееся в фокальной плоскости объектива. Какое увеличение дает телескоп в этом случае? Каков диаметр дифракционного изображения какой-либо звезды (диаметр кружка Эйри) в фокальной плоскости объектива?

**3.328.** Какова разрешающая сила человеческого глаза для зеленых лучей ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ ) при диаметре зрачка  $4 \text{ мм}$ ? Средний показатель преломления составляет для глаза  $n = 1,4$ .

**3.329.** Диаметр зрачка при наблюдении в призматический бинокль с 8-кратным увеличением равен  $5 \text{ мм}$ . Каков должен быть диаметр оправы объектива, чтобы увеличение разрешающей способности, получающееся при пользовании биноклем, по сравнению с невооруженным глазом, было тоже 8-кратным?

**3.330.** Фары автомобиля расположены на расстоянии  $1,2 \text{ м}$  друг от друга. На каком расстоянии от приближающегося автомобиля наблюдатель сможет воспринять их по отдельности? Диаметр зрачка глаза принять равным  $5 \text{ мм}$ , длину волны света –  $550 \text{ нм}$ . Считать, что искомое расстояние определяется только дифракционными эффектами на отверстии зрачка.

**3.331.** Диаметр Венеры около  $13\,000 \text{ км}$ . Когда мы видим ее как «вечернюю» или «утреннюю» звезду, Венера находится на расстоянии  $1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$  (приблизительно равном расстоянию от Земли до Солнца). Невооруженному глазу она кажется «большой, чем точка». Видим ли мы истинный размер Венеры?

**3.332.** Ученик сидит за задней партой, отстоящей от классной доски на расстоянии  $10 \text{ м}$ . Определите, какой минимальный размер должны иметь цифры или буквы на доске, чтобы ученик мог их различать, если угловая разрешающая способность нормального глаза для отдельных деталей букв и цифр, зависящая от освещенности и характера рассматриваемого объекта, при данных условиях равна  $2$  и размер деталей, составляющих букву или цифру, примерно в  $5$  раз меньше размеров букв или цифр. (В действительности буквы и цифры нужно писать крупнее, так как доска не абсолютно черная, а буквы, написанные на ней, не абсолютно белые.)

**3.333.** Объект каких минимальных размеров можно рассматривать в микроскоп, объектив которого имеет диаметр  $0,6 \text{ см}$  и фокусное расстояние  $0,4 \text{ см}$ , если объект освещать светом с длиной волны  $550 \text{ нм}$ ? При решении задачи объектив микроскопа принять за тонкую линзу.

**3.334.** Как будет выглядеть изображение мелкой сетки, даваемое микроскопом, если в фокальной плоскости его объектива поместить диафрагму в виде щели, параллельной вертикальным штрихам сетки? горизонтальным штрихам? под углом  $45^\circ$  к тем и другим штрихам?

**3.335.** Каким должно быть увеличение зрительной трубы для того, чтобы полностью использовать разрешающую способность ее объектива?

**3.336.** Полагая, что при естественном освещении наибольшая энергия излучения приходится на длину волны около  $555 \text{ нм}$ , определите: а) минимальное разрешаемое угловое расстояние для глаза при адаптации на небольшие яркости (диаметр зрачка  $4 \text{ мм}$ ); б) наименьшее

разрешаемое глазом расстояние между штрихами, начерченными на листе бумаги, находящемся на расстоянии ясного зрения (25 см).

**3.337.** Определите разрешающую способность  $\varphi_{\min}$  зрительной трубы с диаметром объектива  $D = 5$  см. При каком увеличении будет полностью использована разрешающая способность этой трубы? Диаметр зрачка глаза  $d = 5$  мм.

**3.338.** Диаметр зеркала телескопа 5 м. Найдите разрешаемое им угловое расстояние  $\varphi_{\min}$  для длины волны 550 нм.

**3.339.** В чем преимущество телескопов при рассматривании звезд, если они не дают увеличения по сравнению с невооруженным глазом?

**3.340.** О зоркости хищных птиц ходят легенды. Оцените на основе дифракционных соображений, может ли орел, летящий над землей на высоте 1 км, разглядеть мышонка размером в 2 см, или он сможет только обнаружить его присутствие.

**3.341.** Какую минимальную длину должен иметь отрезок на Луне и на Солнце, чтобы его изображение в рефлекторе с диаметром зеркала 6 м можно было отличить от изображения точки?

**3.342.** Каково должно быть минимальное расстояние между двумя точками на поверхности Марса, чтобы их изображение в телескопе (рефлекторе) с диаметром объектива 60 см можно было отличить от изображения одной точки? Считать, что Марс наблюдается в момент великого противостояния, когда расстояние от него до Земли минимально и составляет  $5,6 \cdot 10^7$  км.

**3.343.** Камера длиной  $L = 10$  см с малым отверстием предназначена для фотографирования удаленных предметов. Оцените диаметр отверстия  $D$  камеры, при котором она имеет наибольшую разрешающую способность. Длина волны  $\lambda = 500$  нм.

**3.344.** В принципе можно построить телескоп сколь угодно высокой разрешающей способности без объектива, заменив объектив круглым отверстием. Какова должна быть длина  $L$  такого телескопа, чтобы он имел ту же разрешающую способность, что и обычный телескоп с диаметром объектива  $D = 1$  м? Чему будет равна светосила  $S$  такого телескопа? Длина волны  $\lambda = 550$  нм.

**3.345.** На спутниках устанавливаются фотокамеры, позволяющие «разрешить» объекты, имеющие линейные размеры около 30 см. Каков должен быть диаметр объектива такой фотокамеры, если спутник находится на высоте 250 км?

**3.346.** Сколь мало может быть угловое расстояние между двумя звездами, если их изображения едва разрешаются рефракторами Пулковской обсерватории? Диаметр объектива рефрактора 76 см, фокусное расстояние объектива 14 м. Длину волны света считать равной 550 нм. Определите расстояние между этими разрешимыми на пределе звездами, если каждая из них удалена от Земли на 10 св. лет. Найдите диаметр кружка Эйри.

**3.347.** Диаметр зеркала Большого азимутального телескопа 6 м, фокусное расстояние 24 м. Оцените диаметр кружка Эйри и предельное угловое разрешение, которое может быть получено на этом телескопе.

### 3.7. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

#### Поляризация при отражении от диэлектрика. Формулы Френеля. Законы Малюса и Брюстера

**3.348.** Зависят ли амплитуды отраженной от диэлектрика и преломленной волн от направления поляризации падающей волны?

**3.349.** В какое время дня изображение Солнца в спокойной воде обладает наибольшей яркостью?

**3.350.** Покажите, что отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны, если угол падения равен углу Брюстера.

**3.351.** Как, используя поляризованный свет, можно определить показатель преломления непрозрачного диэлектрика (например, эмали)?

**3.352.** Возможна ли полная поляризация проходящего через диэлектрик света? отраженного света? Как зависят степени поляризации отраженного и проходящего света от угла падения?

**3.353.** Какие направления колебаний светового вектора относительно плоскости падения преобладают в проходящем свете? в отраженном?

**3.354.** На пути естественного света расположены два поляроида, ориентированные так, что они совсем не пропускают свет. Будет ли свет пропускаться системой, если между этими поляроидами поместить третий, ориентированный произвольно?

**3.355.** Определите коэффициент преломления: а) непрозрачной эмали, если угол полной поляризации при отражении оказался равным  $58^\circ$ ; б) прозрачного вещества, если угол полной поляризации (при падении света извне) оказался равным предельному углу (наименьшему углу, при котором наблюдается полное отражение).

**3.356.** Найдите угол полной поляризации при отражении от границы стекло – вода.

**3.357.** Каков должен быть преломляющий угол у стеклянной призмы, чтобы углы входа и выхода луча из призмы были углами полной поляризации? Чему равен при таком преломляющем угле угол наименьшего отклонения?

**3.358.** Луч естественного света с интенсивностью  $I_0$  падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку. Угол падения равен углу полной поляризации. При таком угле падения на стекло интенсивность отраженного луча составляет около  $0,1I_0$ . Определите интенсивность есте-

ственного и поляризованного света для лучей 1 – 4 (рис. 3.42), а также степень поляризации прошедшего света. Поглощением света в пластинке пренебречь.

**3.359.** Поглощение света в николе таково, что наибольшая интенсивность света, прошедшего сквозь николь, равна 90% интенсивности поляризованного света, падающего на него. Во сколько раз уменьшается интенсивность естественного света, если свет проходит

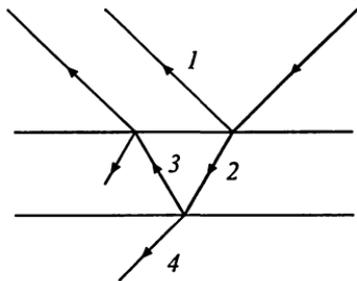


Рис. 3.42

сквозь два николя, плоскости поляризации которых составляют угол  $63^\circ$ ? Во сколько раз уменьшается интенсивность света, если кроме двух николей свет проходит еще сквозь третий николь, направление плоскости поляризации которого такое же, как для первого николя?

**3.360.** Предельный угол полного отражения для некоторого вещества равен  $45^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

**3.361.** Чему равен показатель преломления стекла, если при отражении света от стеклянной пластинки отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления  $30^\circ$ ?

**3.362.** Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ( $n = 1,5$ ) сосуд, и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при падении его на дно сосуда под углом  $42^\circ 37'$ . Найдите: а) показатель преломления жидкости; б) угол, под которым должен падать на дно сосуда луч света, идущий в этой жидкости, чтобы наступило полное отражение.

**3.363.** На боковую грань призмы, изготовленной из стекла с показателем преломления 1,5, падает под углом Брюстера световой пучок, электрический вектор которого лежит в плоскости падения. Каким должен быть преломляющий угол призмы, чтобы свет прошел через нее, не испытав потерь на отражение?

**3.364.** При каких условиях луч света, падающий на боковую грань прозрачной изотропной призмы с преломляющим углом  $\theta = 60^\circ$ , проходит через нее без потерь на отражение?

**3.365.** На поверхность стеклянной пластинки падает пучок естественного света. Угол падения равен  $45^\circ$ . Найдите с помощью формул Френеля степень поляризации: а) отраженного света; б) преломленного света.

**3.366.** Найдите степень поляризации света, отраженного от поверхности стеклянной пластинки под углами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $56^\circ 51'$  и  $90^\circ$  (показатель преломления стекла  $n = 1,50$ ). Падающий свет – естественный.

**3.367.** Степень поляризации частично поляризованного света равна 0,25. Найдите отношение интенсивности поляризованной составляющей этого света к интенсивности естественной составляющей.

**3.368.** Определите коэффициент отражения  $R$  естественного света, падающего на стеклянную пластинку ( $n = 1,50$ ) под углом полной поляризации. Найдите степень поляризации ( $p$ ) света, прошедшего в пластинку. Поглощением света пренебечь.

**3.369.** Естественный свет проходит сквозь плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,50$ ), падая на нее под углом полной поляризации. Найдите степень поляризации света, прошедшего сквозь пластинку.

**3.370.** Две призмы Николя расположены так, что их плоскости поляризации образуют угол  $\alpha = 65^\circ$ . Определите, во сколько раз интенсивность  $I$  света, прошедшего через эти две призмы, будет меньше интенсивности  $I_0$  света, падающего на первую призму. При решении задачи учесть, что каждая из призм из-за поглощения уменьшает интенсивность проходящего через нее света на 10%.

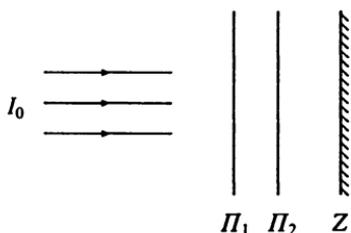


Рис. 3.43

**3.371.** На рисунке 3.43 изображена оптическая система, состоящая из двух поляризаторов  $P_1$  и  $P_2$  в виде тонких пленок и плоского металлического зеркала  $Z$ . Поляризаторы  $P_1$  и  $P_2$  установлены так, что их оси образуют угол  $\alpha$ . На систему направляют параллельный пучок естественного света с интенсивностью  $I_0$ . Какова интенсивность пучка света, отраженного от системы? Отражением света

от поляризаторов и поглощением в них пренебечь. Как изменится ответ, если на систему падает линейно поляризованный свет той же интенсивности, у которого вектор  $\vec{E}$  параллелен оси поляризатора  $P_2$ .

**3.372.** Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в четыре раза? Поглощением света пренебечь.

**3.373.** Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями равен  $\alpha$ . Как поляризатор, так и анализатор поглощают и отражают 8% интенсивности падающего на них света. Оказалось, что интенсивность света, вышедшего из анализатора, составляет 9% от интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найдите угол  $\alpha$ .

### Поляризация при двойном лучепреломлении. Интерференция поляризованного света

**3.374.** Почему турмалин, как и любое поляризационное устройство, пропускает не более половины естественного света?

**3.375.** Предположим, что лобовое стекло и фары автомашин сделаны из поляроидов. Как должны быть расположены оси поляроидов, чтобы водитель видел дорогу, освещенную светом его фар, но не страдал от ослепляющего действия фар встречных машин?

**3.376.** Изобразите главное сечение двоякопреломляющего кристалла. Пользуясь рисунком, поясните различие условий распространения для обыкновенного и необыкновенного лучей.

**3.377.** Поясните с помощью рисунка различие между положительными и отрицательными одноосными кристаллами.

**3.378.** Является ли оптическая ось двоякопреломляющего кристалла определенной линией или это только направление в пространстве? Обладает ли оптическая ось направленностью наподобие стрелы?

**3.379.** Будет ли скорость распространения необыкновенного луча в двоякопреломляющем кристалле всегда определяться отношением  $c/n_e$ ?

**3.380.** Относительно кристалла льда в таблицах можно найти следующие данные:  $n_o = 1,309$ ,  $n_e = 1,313$ . Однако, если лед есть вещество двоякопреломляющее, то почему мы не видим двойного изображения предметов при рассматривании их через ледяную пластинку?

**3.381.** Выполнив построение Гюйгенса, определите направления обыкновенного и необыкновенного лучей при преломлении на границе воздух – положительный кристалл для следующих случаев: а) наклонное падение, оптическая ось кристалла ориентирована под некоторым углом к его поверхности; б) нормальное падение, оптическая ось кристалла параллельна нормали к его поверхности; в) нормальное падение, оптическая ось кристалла ориентирована под некоторым углом к его поверхности; г) нормальное падение, оптическая ось кристалла параллельна поверхности.

**3.382.** Выполните построение (см. задачу 3.381) для отрицательного кристалла.

**3.383.** Почему, если через плоскопараллельную двоякопреломляющую кристаллическую пластинку смотреть на удаленный предмет, видно одно изображение, а не два, как для близко расположенных предметов?

**3.384.** В каком из случаев, рассмотренных в задаче 3.381, на выходе из кристаллической пластинки получается эллиптически поляризованный свет, если падающий свет линейно поляризован?

**3.385.** Как подобрать нужную толщину четвертьволновой (полу-волновой) пластинки, если свойства кристалла известны?

**3.386.** Как изменится состояние поляризации плоско поляризованного света после прохождения полуволновой пластинки?

**3.387.** Каким образом можно получить свет, поляризованный по кругу? Можно ли с помощью одной и той же установки получить левую и правую поляризации?

**3.388.** Как можно экспериментально определить, является ли некоторая прозрачная пластинка пластинкой из обыкновенного стекла, четвертьволновой пластинкой или полуволновой?

**3.389.** Изобразите зависимость интенсивности света, прошедшего анализатор, от угла поворота главной плоскости анализатора, если на анализатор падает: а) естественный свет; б) плоско-поляризованный свет; в) эллиптически поляризованный свет; г) частично плоско-поляризованный свет; д) свет, поляризованный по кругу. Зависимость постройте в декартовых и в полярных координатах.

**3.390.** Предложите схему установки, которая позволила бы различить: а) естественный свет и свет, поляризованный по кругу; б) эллиптически поляризованный свет и частично плоско-поляризованный; в) правую и левую круговые поляризации.

**3.391.** В интерференционной схеме Юнга парные щели закрыты поляроидами. Как будет меняться интерференционная картина, наблюдаемая на экране, если один из поляроидов поворачивать вокруг оси, перпендикулярной его плоскости?

**3.392.** Опишите картину, которая должна наблюдаться в параллельных лучах монохроматического света при помещении между скрещенными поляроидами плоскопараллельной пластинки, вырезанной из одноосного кристалла параллельно оптической оси (рис. 3.44).

**3.393.** Что будет наблюдаться на экране, если в условиях опыта, описанного в предыдущей задаче, плоскопараллельную пластинку заменить на клиновидную, вырезанную так, что оптическая ось параллельна ребру клина?

**3.394.** Почему видимая толщина пластинки исландского шпата, измеренная оптически путем с помощью поляризационного микроскопа, имеет два разных значения  $d_1$  и  $d_2$ ? Как надо вырезать пластинку, чтобы значения  $d_1$  и  $d_2$  были экстремальными? Найдите эти экстремальные значения, если толщина пластинки 1 мм (для исландского шпата  $n_o = 1,658$ ,  $n_e = 1,486$ ).

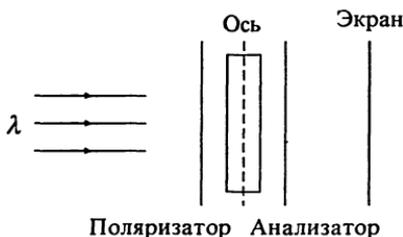


Рис. 3.44

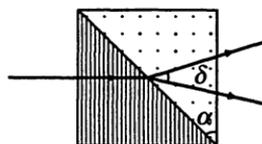


Рис. 3.45

**3.395.** Узкий пучок естественного света падает нормально на поверхность призмы Волластона (рис. 3.45), сделанной из исландского

шпата ( $n_o = 1,658$ ,  $n_e = 1,486$ ). Оптические оси обеих частей призмы взаимно перпендикулярны. На какой угол  $\delta$  будут разведены обыкновенный и необыкновенный лучи на выходе из призмы, если угол  $\alpha = 15^\circ$ ?

**3.396.** Параллельный пучок света падает нормально на пластинку исландского шпата, вырезанную параллельно оптической оси. Определите разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей, прошедших через пластинку. Толщина пластинки равна  $0,03$  мм;  $n_o = 1,658$ ,  $n_e = 1,486$ .

**3.397.** Какой должна быть наименьшая толщина пластинки кварца, вырезанной параллельно оптической оси, чтобы падающий плоскополяризованный свет выходил поляризованным по кругу ( $n_o = 1,5533$ ,  $n_e = 1,5442$ ,  $\lambda = 500$  нм)?

**3.398.** Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ , поляризованный по правому кругу, падает нормально на полуволновую пластинку. Каково состояние поляризации света, прошедшего через эту пластинку?

**3.399.** Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  падает нормально на поляроид, а затем на полуволновую пластинку. Главная плоскость поляроида, в которой лежит электрический вектор пропускаемой им волны, составляет угол  $\alpha$  с осью пластинки. Каково состояние поляризации прошедшего света на выходе из пластинки?

**3.400.** Параллельный пучок монохроматического света проходит через два николя, главные плоскости которых повернуты относительно друг друга на угол  $\alpha = 20^\circ$ . Между николями ставят пластинку одноосного кристалла, вырезанную параллельно оптической оси и вносящую разность хода  $\lambda/2$  между обыкновенным и необыкновенным лучами. Какой угол  $\beta$  должна составлять оптическая ось пластинки с главным направлением первого николя, чтобы свет через эту систему не проходил?

**3.401.** Два николя  $1$  и  $2$  повернуты один относительно другого на угол  $\alpha$  и между ними помещен николю  $3$ . На систему падает параллельный пучок неполяризованного света. Предполагая, что необыкновенный луч проходит через каждый николю без потерь, найдите ориентацию николя  $3$  относительно николя  $1$ , при которой интенсивность проходящего света максимальна. Определите интенсивность проходящего света в этих положениях, если интенсивность падающего света равна  $I_0$ .

**3.402.** На пластинку кварца, вырезанную параллельно оптической оси, нормально падает белый свет, поляризованный по кругу. За пластинкой поставлен поляроид, главное направление которого составляет угол  $20^\circ$  с осью пластинки. Прошедший свет попадает в щель спектрографа. Определите число темных полос  $m$  в спектре, если толщина кварцевой пластинки  $d = 2$  мм,  $n_o = 1,55$ ,  $n_e = 1,54$ . Падающий

свет занимает интервал длин волн от  $\lambda_1 = 400$  нм до  $\lambda_2 = 500$  нм, в котором  $n_e - n_o = \text{const}$ .



Рис. 3.46

**3.403.** Клин из двоякопреломляющего вещества помещен на пути монохроматического света, поляризованного по кругу (рис. 3.46). Оптическая ось клина параллельна ребру клина. Свет, прошедший через клин, рассматривается через поляризатор, главное направление которого составляет

угол  $45^\circ$  с ребром клина. Найдите число темных полос  $m$ , наблюдаемых на поверхности клина. Максимальная толщина клина  $0,05$  см,  $n_o = 1,54$ ,  $n_e = 1,55$ ,  $\lambda = 500$  нм.

**3.404.** Кварцевая пластинка, вырезанная параллельно оптической оси, помещена между скрещенными николями так, что ее оптическая ось составляет угол  $45^\circ$  с главными направлениями николей. При какой минимальной толщине пластинки свет с длиной волны  $\lambda_1 = 644$  нм будет проходить через эту систему с максимальной интенсивностью, а свет с длиной волны  $\lambda_2 = 564$  нм будет сильно ослаблен? Разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей для обеих длин волн считать одинаковой и равной  $n_e - n_o = \Delta n = 0,009$ .

**3.405.** Между двумя скрещенными поляриоидами поместили кварцевый клин с преломляющим углом  $\theta = 3,5^\circ$ . Оптическая ось клина параллельна его ребру и составляет  $45^\circ$  с главными направлениями поляриоидов. При прохождении через эту систему света ( $\lambda = 550$  нм) наблюдается система интерференционных полос. Ширина каждой полосы  $x = 1$  мм. Определите разность показателей преломления кварца для обыкновенного и необыкновенного лучей указанной длины волны.

### 3.8. РАССЕЯНИЕ СВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. ФАЗОВАЯ И ГРУППОВАЯ СКОРОСТИ

**3.406.** Почему цвет чистого неба голубой, а цвет облаков, освещенных Солнцем, белый?

**3.407.** Из-за наличия межзвездной пыли звезды кажутся более красными, чем они есть на самом деле. Как это объяснить?

**3.408.** Почему цвет Солнца на закате или цвет Луны вблизи горизонта оранжево-красный, а цвет Солнца или Луны, находящихся высоко над горизонтом, белый?

**3.409.** Время от времени астрономы регистрируют рождение так называемых сверхновых звезд. Этот процесс является взрывом обычной звезды. Свет сверхновой доходит до нас в виде белого сияния. Какое заключение можно сделать на основе этого факта о скорости света разных длин волн в вакууме? Чем отличалась бы регистрация

рождения сверхновой звезды, если бы вакуум обладал дисперсией? Зависит ли скорость света в вакууме от длины волны, от интенсивности, от скорости источника или приемника?

**3.410.** О какой скорости света (фазовой или групповой) идет речь в выводе закона преломления на основе принципа Гюйгенса?

**3.411.** Поясните, почему именно групповая скорость света определяет скорость переноса энергии в пространстве.

**3.412.** Может ли фазовая скорость электромагнитных волн быть больше скорости света в вакууме?

**3.413.** В каких случаях групповая скорость больше фазовой? Может ли групповая скорость в области аномальной дисперсии быть больше скорости света в вакууме?

**3.414.** Вычислите групповую скорость  $u$  для различных законов дисперсии ( $v$  – фазовая скорость):

1)  $v = a = \text{const}$  – недиспергирующая среда, например звуковые волны в воздухе;

2)  $v = a \sqrt{\lambda}$  – волны на поверхности воды, вызываемые силой тяжести;

3)  $v = a / \sqrt{\lambda}$  – капиллярные волны;

4)  $v = a/\lambda$  – поперечные колебания струны;

5)  $v = \sqrt{c^2 + a^2 \lambda^2}$  – электромагнитные волны в ионосфере ( $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны в среде).

**3.415.** На рисунке 3.47 изображена кривая зависимости фазовой скорости волны  $v$  от длины волны  $\lambda$ . Покажите, что отрезок  $OA$  на оси  $v$ , отсекаемый касательной к этой кривой в точке  $\lambda_0$ , равен групповой скорости в окрестности длины волны  $\lambda_0$ .

**3.416.** Классическая электронная теория позволяет найти зависимость показателя преломления от частоты света. Особенно хорошо согласуется с опытом формула  $n(\omega)$  для газов:

$$n(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где  $N$  – концентрация газа,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $\omega_0$  – собственная частота колебаний оптического электрона. Найдите показатель преломления аргона для желтой линии натрия при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $3\text{ МПа}$ , если при нормальных условиях он равен  $1,000057$ .

**3.417.** В современной технике для измерения высоты облаков, высоты летательных аппаратов при аэротоъемке и т.д. применяется

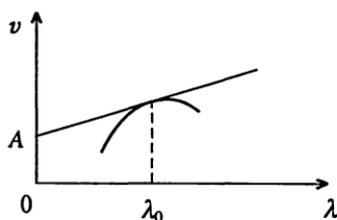


Рис. 3.47

метод лазерной светодальнометрии. Расстояния в этом методе измеряют по времени распространения импульса оптического излучения от точки, в которой расположен источник света (лазер), до объекта, отражающего это излучение. На какой высоте находится объект, если отраженный от него импульс света приходит через 100 мкс после посылки? Какова абсолютная погрешность измерения расстояний в описанном методе, если длительность импульса света 100 нс?

**3.418.** Получите выражение для скорости света  $c$  в опыте Физо, если имеет место  $N$ -е затемнение. Расстояние между колесом и зеркалом равно  $D$ , угловая скорость колеса  $\omega$ , число зубцов  $Z$ . Угловые скорости колеса при трех последовательных исчезновениях света равны 326, 457 и 588 рад/с.

**3.419.** Коэффициент преломления воды в интервале длин волн от 546 до 589 нм меняется от 1,33447 до 1,33300. Определите среднюю фазовую и среднюю групповую скорости света для этого интервала длин волн.

### 3.9. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИКЕ

**3.420.** Может ли скорость удаления какой-либо галактики от нас равняться скорости света? Если это возможно, то можно ли видеть эту галактику?

**3.421.** Сравните формулы для доплеровского сдвига частоты света и звука. В чем причина различия этих формул? Почему в оптическом эффекте Доплера величина  $\Delta\nu$  не зависит от того, что движется: источник или наблюдатель, а в акустическом эффекте такая зависимость существует?

**3.422.** Чем отличается спектр водорода, полученный в газоразрядной трубке в условиях Земли, от спектра водорода в излучении какой-либо звезды? Как вы ответите на тот же вопрос относительно спектра более тяжелого элемента?

**3.423.** В точности ли совпадают спектры излучения Солнца, полученные при наблюдении разных точек края солнечного диска?

**3.424.** Закон Хаббла определяет зависимость скорости галактики от ее расстояния до Земли:  $v = Hr$ , где  $v$  – скорость, выраженная в километрах в секунду;  $r$  – расстояние, выраженное в мегапарсеках;  $H = 75 \text{ км}/(\text{с}\cdot\text{Мпк})$  – постоянная Хаббла. Оцените точность, с которой нужно определять длину волны света для того, чтобы можно было найти скорость одной из ближайших к нам галактик – туманности Андромеды ( $r = 2 \cdot 10^6$  св. лет).

**3.425.** Портативный радиолокатор, использующийся для определения скорости автомобиля на шоссе, работает на длине волны 3 см. Определите скорость приближающегося автомобиля, если разность час-

тот сигнала передатчика и сигнала, отраженного от автомобиля в месте расположения радиолокатора равна  $10^3$  Гц.

**3.426.** Может ли доплеровское изменение длины волны  $\Delta\lambda$  быть больше  $\lambda$ ?

**3.427.** Возможно ли наблюдение явления Доплера, если источник испускает сплошной спектр?

**3.428.** С какой скоростью должен приближаться к Земле космический корабль, чтобы луч лазера, направленный с Земли на корабль (длина волны рубинового лазера  $\lambda_1 = 694,3$  нм) показался наблюдателю, находящемуся на корабле, зеленым ( $\lambda_2 = 555$  нм)?

**3.429.** Каково доплеровское смещение  $\Delta\lambda$  линии водорода  $H_\beta$  ( $\lambda = 486,1$  нм) при наблюдении вдоль пучка атомов водорода, движущихся со скоростью  $1,3 \cdot 10^6$  м/с?

**3.430.** При помощи приемника радиолокационной станции определяют скорость приближающегося самолета по частоте биений между частотой сигнала передатчика и частотой отраженного от самолета сигнала. На какой длине волны должен работать радиолокатор, чтобы приближающийся со скоростью 800 км/ч самолет дал частоту биений 400 Гц?

**3.431.** Каково максимальное доплеровское смещение  $\Delta\lambda$  для линии водорода  $H_\beta$ , излучаемой движущимися атомами водорода с кинетической энергией 4 МэВ?

**3.432.** Как движется относительно Земли некоторая туманность, если линия водорода  $H_\gamma$  ( $\lambda = 434$  нм) в спектре туманности смещена на 2 нм в красную сторону?

**3.433.** Каково максимальное полугодичное изменение длины волны зеленых линий ( $\lambda = 550$  нм) спектра звезд, лежащих в плоскости земной орбиты?

**3.434.** Период вращения Солнца вокруг оси равен 24,7 земных суток. Радиус Солнца  $7 \cdot 10^8$  м. Какое доплеровское смещение  $\Delta\lambda$  можно ожидать в окрестности длины волны фразунгоферовой  $\alpha$ -линии водорода ( $\lambda = 656,3$  нм), испускаемой краем солнечного диска?

**3.435.** В астрофизике явление Доплера используется для оценки скорости извержения водорода в протуберанцах. Определите эту скорость, если измерения показали для  $\alpha$ -линии водорода ( $\lambda = 656,3$  нм) доплеровский сдвиг  $\Delta\lambda \approx 0,7$  нм.

**3.436.** В 1961 г. впервые был применен спектроскопический метод измерения скорости вращения Солнца. С этой целью сравнивался относительный доплеровский сдвиг  $\Delta\lambda/\lambda$  спектральных линий от диаметрально противоположных краев солнечного диска. Определите период вращения Солнца, если максимальное значение  $\Delta\lambda/\lambda$  равно  $1,6 \cdot 10^{-5}$ . Наблюдение за движением солнечных пятен показывает, что точки, расположенные на экваторе Солнца, имеют скорость 2 км/с, что также позволяет вычислить период вращения Солнца. Сравните значения периодов, полученные первым и вторым методами.

## Раздел 4

# ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

### 4.1. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

**Фотоэффект. Давление света. Эффект Комптона.  
Тормозное рентгеновское излучение**

**4.1.** На алюминиевый шарик, удаленный от других тел, направляют один раз ультрафиолетовое излучение, а другой – видимое. Оказалось, что в первом случае шарик заряжается, а во втором нет. Каков знак заряда на шарике? Почему он не заряжается во втором случае? Каким должен был бы быть результат опыта с точки зрения классической физики?

**4.2.** Если в опыте (см. задачу 4.1) использовать шарик из цезия, то окажется, что он заряжается и во втором случае, но не заряжается при использовании инфракрасного излучения. Какова причина наблюдаемого различия? Как будет меняться заряд на шарике при увеличении интенсивности света?

**4.3.** Можно ли считать, что время установления фототока при фотоэффекте приближенно равно времени, в течение которого энергия света, приходящаяся на поперечное сечение атома, расходуется на отрыв электрона? Ответ поясните.

**4.4.** Для определения запирающего напряжения  $U_0$  и проверки уравнения Эйнштейна для фотоэффекта П. И. Лукирский и С. С. Прилежаев (1928 г.) использовали вакуумный сферический конденсатор, внешняя обкладка которого играла роль анода, внутренняя – катода. Почему при использовании такого конденсатора резко увеличивается наклон вольт-амперной характеристики в области напряжений, близких к  $U_0$ ?

**4.5.** Через вакуумный фотоэлемент протекает фототок насыщения. Если заполнить этот фотоэлемент инертным газом, то сила фототока при той же освещенности резко изменяется. Как и почему?

**4.6.** Почему для изготовления газонаполненных фотоэлементов обычно используют инертные газы?

4.7. Почему результаты фотоэлектрических измерений очень сильно зависят от состояния поверхности фотокатода? Почему в качестве материала для катодов фотоэлементов часто выбирают щелочные металлы?

4.8. Почему для фотоэлементов, имеющих катоды, выполненные из одинаковых металлов, могут различаться красные границы фотоэффекта?

4.9. Красная граница фотоэффекта определяется с помощью уравнения Эйнштейна, базирующегося на предположении о том, что электрон поглощает один фотон (одnofотонный фотоэффект). Может ли электрон поглотить одновременно два фотона? Как должны выглядеть законы фотоэффекта в этом случае? Почему двухфотонный эффект в обычных условиях не наблюдается?

4.10. Можно ли, в принципе, получить излучение с длиной волны  $\lambda = 10^{-11}$  м с помощью рентгеновской трубки, к которой приложено напряжение 50 кВ? Какой ответ на этот вопрос дает классическая физика?

4.11. Возникновение тормозного рентгеновского излучения можно рассматривать как процесс, обратный фотоэффекту. Почему при определении коротковолновой границы тормозного спектра не учитывается работа выхода?

4.12. Средняя длина волны излучения лампы накаливания с металлической спиралью равна 1200 нм. Найдите число фотонов, испускаемых лампой мощностью 200 Вт в единицу времени.

4.13. Сколько фотонов со средней длиной волны 550 нм падает за 1 с на 1 м<sup>2</sup> поверхности, если солнечная постоянная  $J = 1,35 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>?

4.14. Какова длина волны, если энергия кванта, соответствующего этой волне, равна энергии покоя электрона?

4.15. Сравните энергии фотонов (выраженные в электронвольтах), соответствующих длинам волн  $\lambda_1 = 10$  мкм (инфракрасный диапазон),  $\lambda_2 = 550$  нм (видимый диапазон),  $\lambda_3 = 0,1$  нм (рентгеновский диапазон) и  $\lambda_4 = 10^{-4}$  пм ( $\gamma$ -диапазон).

4.16. В прозрачном эвакуированном сосуде на тонкой кварцевой нити уравновешено коромысло с двумя легкими дисками, один из которых прозрачен, а другой зачернен. Оба диска одновременно подвергают одинаковому импульсному облучению лазером. Что произойдет с коромыслом и нитью? Как изменится результат опыта, если вместо прозрачного диска использовать зеркальный?

4.17. В условиях опыта (см. задачу 4.16) на два одинаковых зеркальных диска направляют одинаковые узкие пучки лазерного излучения; на один из дисков пучок падает нормально, а на другой под острым углом. Что произойдет в этом случае?

4.18. Опыт показывает, что если камеру Вильсона облучать жесткими рентгеновскими лучами, то в ней можно обнаружить треки бы-

стрых заряженных частиц – релятивистских электронов, даже когда интенсивность излучения мала. Можно ли объяснить результаты опыта с классических позиций? Как их объясняет квантовая теория?

**4.19.** Комптон, изучая рассеяние узкого пучка жесткого монохроматического рентгеновского излучения на веществах, состоящих из легких атомов, обнаружил с помощью рентгеновского спектрографа в рассеянном излучении две линии, одна из которых соответствует исходной длине волны, а другая – большей. Как квантовая теория объясняет следующие результаты опыта: разность длин волн этих линий одинакова для любых рассеивающих веществ и не зависит от исходной длины волны, интенсивность смещенной линии по сравнению с несмещенной велика для веществ из легких атомов и мала для тяжелых?

**4.20.** С излучением каких двух из четырех перечисленных длин волн:  $10^{-8}$  м,  $5 \cdot 10^{-10}$  м,  $5 \cdot 10^{-11}$  м,  $10^{-13}$  м удобнее наблюдать эффект Комптона? По каким причинам затруднены или вообще невозможны такие наблюдения для двух других длин волн?

**4.21.** Почему спектральные линии рассеянного излучения в эффекте Комптона (смещенная и несмещенная) уширены?

**4.22.** Может ли рассеяние фотона на свободном электроне привести к увеличению частоты фотона?

**4.23.** Может ли свободный электрон поглотить или испустить фотон?

**4.24.** Согласно классической электромагнитной теории света энергия, излучаемая источником света, непрерывно распространяется во все стороны. Через какой промежуток времени, согласно этой теории, отдельный атом цезиевого катода может накопить столько энергии, чтобы стал возможным вылет фотоэлектрона, если катод находится на расстоянии  $l = 10$  м от лампы мощностью  $P = 25$  Вт? Считать, что фотоэлектрону передается вся энергия, накапливающаяся в атоме цезия; диаметр атома  $d \approx 0,2$  нм.

**4.25.** В 1916 г. Милликеном при исследовании фотоэффекта с использованием натриевого катода были получены данные, приведенные в таблице ( $\nu$  – частота света,  $U_3$  – запирающее напряжение). Постройте график зависимости  $U_3(\nu)$ .

$\nu, 10^{14}$ Гц	5,49	6,92	7,41	8,22	9,60	11,83
$U_3, В$	0,47	1,02	1,20	1,60	2,13	3,02

Используя эти данные, определите: а) постоянную Планка; б) работу выхода для натрия.

**4.26.** При каких длинах волн излучения, вызывающего фотоэффект, в уравнении Эйнштейна классическое уравнение для кинетической энергии электрона следовало бы заменить релятивистским?

4.27. Найдите работу выхода с поверхности некоторого металла, если при поочередном освещении его электромагнитным излучением с длинами волн  $\lambda_1 = 0,33$  мкм и  $\lambda_2 = 0,54$  мкм максимальные скорости фотоэлектронов различаются в  $n = 2,0$  раза.

4.28. Медный шарик, удаленный от других тел, подвергают действию электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,2$  мкм. До какого максимального потенциала зарядится шарик?

4.29. Сила тока насыщения в вакуумном фотоэлементе равна  $I_n = 3 \cdot 10^{-10}$  А. Найдите число электронов  $N$ , вырываемых светом из катода фотоэлемента за 1 с.

4.30. Какова максимальная кинетическая энергия  $W_{k \max}$  фотоэлектронов, вырываемых с поверхности лития электромагнитным излучением, напряженность электрической составляющей которого меняется во времени по закону  $E = a(1 + \cos \omega t) \cos \omega_0 t$ , где  $a$  – постоянная,  $\omega = 6,0 \cdot 10^{14}$  рад/с,  $\omega_0 = 3,6 \cdot 10^{15}$  рад/с.

4.31. Никелевый шарик, играющий роль внутреннего электрода сферического вакуумного фотоэлемента, освещают монохроматическим излучением различных длин волн. Полученные графики зависимости силы фототока от подаваемого напряжения  $U$  показаны на рисунке 4.1. Найдите с помощью этих графиков соответствующие длины волн.

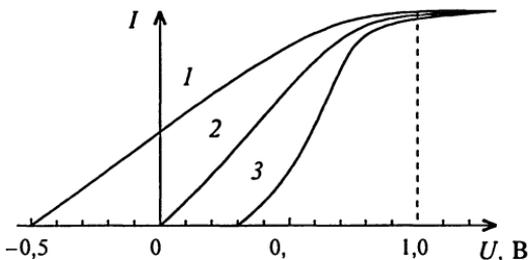


Рис. 4.1

4.32. Увеличение напряжения на рентгеновской трубке в  $n = 2$  раза сопровождается изменением длины волны  $\lambda_0$  коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра на  $\Delta \lambda = 0,03$  нм. Определите значение  $\lambda_0$  и соответствующее ему напряжение на рентгеновской трубке.

4.33. Вычислите скорость электронов, подлетающих к антикатоде рентгеновской трубки, если длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра  $\lambda_{\min} = 0,0157$  нм.

4.34. Определите напряжение на рентгеновской трубке, если известно, что зеркальное отражение узкого пучка ее излучения от естественной грани монокристалла NaCl наблюдается при уменьшении угла скольжения вплоть до  $4,1^\circ$ . Соответствующее межплоскостное расстояние равно 281 пм.

4.35. Фотон испущен с поверхности звезды, масса которой  $M$  и радиус  $R$ . Считая, что фотон обладает массой, вычислите гравитационное смещение длины волны излучения, испускаемого с поверхности: а) Солнца, у которого  $M = 2 \cdot 10^{30}$  кг и  $R = 7 \cdot 10^8$  м; б) нейтронной звез-

ды, масса которой равна массе Солнца, а средняя плотность превышает солнечную в  $10^{14}$  раз.

**4.36.** На основе классической теории гравитации оцените угол, на который отклоняется фотон вследствие гравитационного взаимодействия, проходя у поверхности Солнца ( $M = 2 \cdot 10^{30}$  кг,  $R = 7 \cdot 10^8$  м).

**4.37.** Свободный электрон не может испускать и поглощать фотоны (см. задачу 4.23). Электрон, движущийся в диэлектрической среде с показателем преломления  $n$ , уже нельзя считать свободным. При определенных условиях он может излучать фотоны – такое излучение называется свечением Вавилова – Черенкова. Испускание фотонов происходит в узком конусе с углом  $\theta$ , ось которого практически совпадает с направлением движения электрона. Покажите, что если скорость электрона  $v > c/n$ , то  $\theta$  определяется соотношением  $\sin \theta = c/(nv)$ . Исследуйте случаи, когда: а)  $v < c/n$ ; б)  $n = 1$ .

**4.38.** Найдите с помощью корпускулярных представлений силу светового давления, которое оказывает электромагнитная волна интенсивностью  $I$  при полном освещении: а) плоской зеркальной поверхности площадью  $S$ , угол падения  $\alpha$ ; б) одной половины шара радиусом  $R$  с зеркальной поверхностью; в) плоской абсолютно матовой поверхности площадью  $S$  при нормальном падении.

**4.39.** Прибор Лебедева для исследования светового давления на твердые тела состоял из легкого подвеса на тонкой нити, к которому были прикреплены тонкие легкие крылышки, имевшие форму кружков диаметром 5 мм. Одно из крылышек было зачернено, а другое сделано зеркальным. Подвес находился в откачанном сосуде, образуя весьма чувствительные крутильные весы. Определите силу светового давления на зачерненное крылышко, если мощность падающего на него излучения равна 0,105 Вт.

**4.40.** Наиболее мощные импульсные лазеры излучают в импульсе, длящемся  $\tau = 1,3 \cdot 10^{-4}$  с, энергию  $E = 10$  Дж. Найдите среднее за время импульса давление такого пучка света, если его сфокусировать в пятно диаметром  $d = 10$  мкм на поверхности, перпендикулярной пучку, с коэффициентом отражения  $R = 0,5$ . Сравните это давление с нормальным атмосферным давлением.

**4.41.** При облучении вещества рентгеновским излучением с длиной волны  $\lambda$  обнаружено, что максимальная кинетическая энергия комптоновских электронов  $E_{k, \max} = 0,44$  МэВ. Определите  $\lambda$ .

**4.42.** Фотон испытал рассеяние на покоящемся свободном электро-не. Найдите импульс налетающего фотона, если энергия рассеянного фотона равна кинетической энергии электрона отдачи при угле  $90^\circ$  между направлениями их разлета.

**4.43.** Определите энергию  $\gamma$ -квантов, претерпевших комптоновское рассеяние назад ( $\varphi = 180^\circ$ ), если вылетающий электрон ультрарелятивистский ( $E \gg mc^2$ ).

4.44. В результате комптоновского рассеяния фотона на покоящемся электроне последний получил импульс  $p$ . Под каким максимальным углом  $\varphi$  к направлению падающего фотона мог вылететь электрон с таким импульсом?

4.45. При столкновении с релятивистским электроном фотон рассеялся на угол  $\theta = 60^\circ$ , а электрон остановился. Найдите: а) комптоновское смещение длины волны рассеянного фотона; б) кинетическую энергию электрона до столкновения, если энергия налетающего фотона равна энергии покоя электрона.

4.46. В результате комптоновского рассеяния длина волны фотона с энергией 0,3 МэВ изменилась на 20%. Определите энергию электрона отдачи.

4.47. Фотон рентгеновского излучения с длиной волны  $2,14 \cdot 10^{-2}$  нм в результате эффекта Комптона испытал рассеяние на угол  $90^\circ$  к первоначальному направлению. Какую часть своей энергии фотон передал электрону?

### Тепловое излучение

4.48. Можно ли считать тепловым излучение лампы накаливания, светлячка, люминесцентной лампы, Солнца, лазера, человеческого тела, радиостанции, молнии, экрана телевизора, рентгеновской трубки?

4.49. Два одинаковых тела имеют одну и ту же температуру, но одно из них находится в окружении более холодных тел, чем другое. Будут ли в этих условиях равны мощности излучения этих тел? Какое из тел остынет быстрее, если перестать подводить к нему энергию?

4.50. Увидит ли наблюдатель разницу в яркости двух тел (см. задачу 4.49), если они представляют собой хорошо отражающие металлические предметы? хорошо поглощающие (черные) предметы?

4.51. Объясните изменение цвета нити лампы накаливания при увеличении силы тока: при малой силе тока нить слабо светится красноватым светом, затем яркость нити растет, нить становится желтой и, наконец, лампа ярко светится почти белым светом.

4.52. Температура атмосферы на высоте 300 км от поверхности Земли около 1800 К. Холодным или горячим будет тело, находящееся в такой атмосфере?

4.53. Предскажите результаты такого опыта. Чашка из белого фарфора с темным узором помещена в полость горячей муфельной печи. Что будет светиться ярче: узор или белый фон? Как изменится свечение чашки, если ее быстро вынести из печи? Может ли в какой-то момент узор стать невидимым при остывании чашки в светлом помещении?

4.54. Кратер в угольной дуге светится ярче, чем сами угли. Можно ли считать, что температура кратера заметно выше температуры выпуклой поверхности раскаленного угля?

4.55. Как изменится длина волны, соответствующая максимуму излучения абсолютно черного тела, если его окружить абсолютно поглощающей оболочкой с большей поверхностью, чем у тела, но излучающей такую же мощность, как и тело?

4.56. Почему лампа накаливания имеет малый коэффициент полезного действия, несмотря на то, что энергия, подводимая к нити при пропускании через нее электрического тока, в основном отводится путем излучения?

4.57. В современных люминесцентных лампах спектр излучения в видимой области почти такой же, как и у черного тела, нагретого до высокой температуры. Достаточно ли это основание для того, чтобы считать лампу хорошей моделью абсолютно черного тела?

4.58. Какой будет предельная температура поверхности электрического утюга, если считать, что он теряет энергию только посредством излучения? Потребляемая утюгом мощность 600 Вт, коэффициент полного излучения 0,2, площадь поверхности 300 см<sup>2</sup>, температура окружающей среды 300 К.

4.59. Как можно измерить температуру тела на расстоянии? Рассмотрите случаи, когда температура составляет несколько тысяч кельвин, несколько десятков кельвин, несколько кельвин.

4.60. Найдите давление излучения Солнца вблизи его поверхности, если температура солнечной поверхности равна 5800 К.

4.61. На корпусе космической лаборатории, летящей вокруг Солнца по круговой орбите Земли, установлено устройство, моделирующее абсолютно черное тело. Наружная поверхность оболочки этого устройства является идеально отражающей. Отверстие в оболочке все время обращено к Солнцу. Пренебрегая теплообменом через крепление устройства к корпусу лаборатории, определите равновесную температуру  $T$ , которая установится внутри устройства. Температуру солнечной поверхности принять равной  $T_C = 5800$  К.

4.62. В электрической лампе вольфрамовая нить диаметром  $d = 0,05$  мм при работе лампы накаливается до температуры  $T_1 = 2700$  К. Через какое время после выключения тока температура нити упадет до  $T_2 = 600$  К? При расчете принять, что нить излучает как серое тело с коэффициентом поглощения  $\alpha = 0,3$  и энергия передается только излучением; удельная теплоемкость вольфрама  $c = 1,5 \cdot 10^{-2}$  Дж/(кг·К).

4.63. Отношение суммарной лучеиспускательной способности некоторого тела к лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре равно  $\alpha_T$ . Найдите связь между истинной и радиационной температурами. Может ли радиационная температура быть больше истинной? (Радиационная температура  $T_p$  – температура такого черного тела, полная испускательная способность которого равна испускательной способности данного тела, имеющего температуру  $T$ .)

4.64. Поверхность Солнца близка по своим свойствам к абсолютно черному телу. Максимум лучеиспускательной способности приходится на длину волны  $\lambda_m = 0,50$  мкм. (В излучении Солнца, прошедшем через атмосферу и достигшем поверхности Земли, максимум приходится на длину волны  $\lambda'_m = 0,55$  мкм.) Определите: а) температуру солнечной поверхности; б) мощность электромагнитного излучения Солнца; в) массу  $\Delta m$ , теряемую Солнцем за время  $t = 1$  с вследствие излучения; г) примерное время  $\tau$ , за которое масса Солнца уменьшилась бы за счет излучения на 1%, если бы температура Солнца оставалась постоянной.

4.65. Найдите длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности излучения, и диапазон электромагнитного спектра, к которому они относятся, для следующих случаев: 1)  $T = 3$  К (приближенное значение температуры реликтового излучения, заполняющего Вселенную); 2)  $T = 5800$  К (температура поверхности Солнца); 3)  $T = 310$  К (температура человеческого тела); 4)  $T \leq 10^{10}$  К (температура поверхности нейтронной звезды). Сравните излучательные способности  $\epsilon(\nu, T)$  в этих случаях.

4.66. 1. Какую температуру имела бы абсолютно черная сферическая частица, находящаяся на таком же расстоянии от Солнца, что и Земля? 2. Считая, что атмосфера Земли отражает 35% солнечного излучения, оцените, какую температуру имела бы поверхность Земли, если бы отсутствовал парниковый эффект и Земля излучала бы как абсолютно черное тело.

4.67. Определите температуру Марса и Юпитера, при условии что они отражают соответственно 35 и 45% падающего излучения Солнца. Марс отстоит от Солнца в 1,5 раза, а Юпитер в 5,2 раза дальше, чем Земля. Считать, что эти планеты излучают как абсолютно черные тела.

4.68. Источником радиоизлучения Солнца в метровом диапазоне длин волн является солнечная корона. Эффективный радиус короны  $R$  приблизительно равен  $7 \cdot 10^5$  км, эффективная температура  $T \approx 10^6$  К. Оцените мощность радиоизлучения Солнца  $P$ , падающего на единицу поверхности Земли, в полосе частот  $\Delta\nu = 1$  МГц в окрестности частоты  $\nu = 100$  МГц.

4.69. Найдите отношение интенсивностей ( $I_K/I_0$ ) корпускулярного и электромагнитного излучения Солнца в околоземном пространстве. Считать, что корпускулярное излучение представляет собой нейтральную плазму из электронов и протонов с концентрацией частиц каждого сорта  $n = 5$  см<sup>-3</sup> и скоростью потока  $v = 300$  км/с и что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой  $T = 5800$  К. Угловой диаметр Солнца  $\alpha = 10^{-2}$  рад.

4.70. Преобразуйте формулу Планка для излучательной способности  $\epsilon(\nu, T)$  к виду, соответствующему распределению по длинам волн  $\epsilon(\lambda, T)$ .

4.71. Определите с помощью формулы Планка: а) во сколько раз возрастет излучательная способность в окрестности длины волны 0,60 мкм при увеличении температуры от 2000 до 2300 К; б) излучательную способность в интервале длин волн, отличающихся не более, чем на 0,5% от наиболее вероятной длины волны при температуре 2000 К.

4.72. Получите приближенные выражения формулы Планка для  $\epsilon(\nu, T)$ : а) при  $h\nu \gg kT$ , б) при  $h\nu \ll kT$ .

4.73. Докажите, что спектральная испускательная способность абсолютно черного тела  $\epsilon(\nu, T)$  связана с объемной спектральной плотностью энергии излучения  $u(\nu, T)$  соотношением  $\epsilon(\nu, \lambda) = cu(\nu, T)/4$ .

4.74. Найдите с помощью формулы Планка выражение, определяющее: а) число квантов в единичном объеме в спектральных интервалах  $(\nu, \nu + \Delta\nu)$  и  $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ ; б) полное число квантов в единичном объеме при температуре  $T$ .

## 4.2. МОДЕЛЬ АТОМА БОРА

4.75. Если излучение трубки с разреженным газообразным атомарным водородом, через которую пропускается ток от высоковольтного источника, разложить в спектр с помощью призмы, то он окажется не сплошным, а состоящим в видимой области из четырех цветных полосок. Как объясняет результаты этого опыта теория Бора? Как должен был бы выглядеть этот спектр с точки зрения модели атома Томсона?

4.76. Белый свет пропускают через газообразный атомарный водород, находящийся при достаточно низкой температуре в состоянии, близком к равновесию, и затем наблюдают спектр в видимой и ультрафиолетовой областях. Чем будет отличаться этот спектр от первоначального в каждой из областей? Каково соответствие между спектрами поглощения и испускания? Какому переходу электрона в невозбужденном атоме соответствует линия поглощения с наибольшей длиной волны?

4.77. Нарисуйте в масштабе систему энергетических уровней атома водорода, изобразите стрелками переходы электрона с испусканием и с поглощением фотона. Какие переходы соответствуют одной и той же спектральной серии? Как изменяются при переходе потенциальная и кинетическая энергии электрона?

4.78. Может ли атомарный водород излучать линейчатый спектр в рентгеновском диапазоне длин волн? Какому переходу электрона в атоме соответствует наибольшая частота излучения в линейчатом спектре?

4.79. На фотографии спектра (рис. 4.2) некоторого водородоподобного иона различные линии обозначены цифрами. Какая из линий соответствует наибольшей длине волны?

4.80. В опыте наблюдают спектры поглощения атомарного водорода и однократно ионизированного гелия. Существует ли между этими спектрами какое-либо подобие? Как их различить? Можно ли охарактеризовать различие между спектрами одним параметром? Как изменятся ответы на предыдущие вопросы, если вместо спектра поглощения  $\text{He}^+$  рассматривать соответствующий спектр  $\text{Li}^{2+}$ ?

4.81. На рисунке 4.3 показаны траектории движения  $\alpha$ -частиц при их рассеянии на тонком слое одного и того же металла. Почему  $\alpha$ -частицы изменили направление своего движения? Почему изменение направления различно, хотя начальные скорости  $\alpha$ -частиц одинаковы? Проведите сравнительный анализ достоинств и недостатков моделей атома Томсона и Резерфорда по результатам подобных опытов.

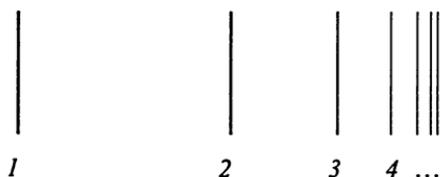


Рис. 4.2

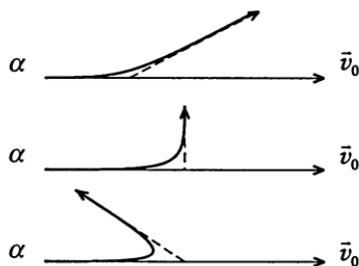


Рис. 4.3

4.82. В трубке с тремя электродами (катод, сетка, анод) находятся пары ртути при небольшом давлении ( $\approx 1$  мм рт. ст.). Сетка имеет положительный относительно катода потенциал, который можно изменять, а анод – небольшой постоянный потенциал, отрицательный относительно сетки. Как меняется анодный ток при изменении сеточного напряжения? Кто впервые осуществил такой опыт?

4.83. В условиях опыта Франка и Герца вместо ртути используют атомарный водород. При минимальном значении силы тока трубка начинает светиться. Является ли этот свет монохроматическим? Какие переходы в атомах водорода при этом происходят?

4.84. Атомарный водород бомбардируется электронами с энергией, равной разности энергий уровней с  $n = 1$  и  $n = 4$ . Какие линии излучения могут быть обнаружены в спектре водорода?

4.85. Процесс рекомбинации заключается в переходе электрона из свободного состояния в одно из стационарных состояний ионизированного атома. Рекомбинация может сопровождаться свечением. Какие особенности спектра рекомбинации позволяют отличить его от линейчатых спектров, возникающих при тепловом возбуждении атома и при возбуждении электронным ударом?

**4.86.** Монохроматическое излучение, энергия кванта которого точно соответствует переходу электрона из основного в первое возбужденное состояние, пропускают сквозь сосуд с атомарным водородом. При этом газ в сосуде нагревается. Объясните, какие процессы привели к нагреванию газа, если стенки сосуда полностью прозрачны.

**4.87.** Оцените частоту колебаний электрона в модели атома Томсона, приняв радиус атома  $r$  равным 0,5 нм и считая заряд  $e$  и массу  $m$  электрона известными величинами.

**4.88.** На какое минимальное расстояние приблизится  $\alpha$ -частица к покоящемуся ядру атома свинца при лобовом соударении, если кинетическая энергия вдали от ядра равна 4 МэВ?

**4.89.** Оцените время жизни атома Бора – Резерфорда на основе классических представлений. Электрон, движущийся с ускорением  $a$ ,

теряет энергию  $E$  на излучение по закону 
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{3c^3} a^2.$$

Расчет выполните для водорода, считая, что первоначально электрон совершает движение по окружности радиусом  $r_0 = 0,05$  нм. Для простоты принять, что вектор  $\vec{a}$  всегда направлен к центру атома.

**4.90.** Если считать, что момент импульса Земли при ее движении вокруг Солнца квантован по теории Бора, то чему будет равняться квантовое число  $n$ ? Можно ли обнаружить такую квантуемость, если бы она существовала?

**4.91.** Для движения по круговым орбитам постройте графики зависимостей кинетической, потенциальной и полной энергий электрона от расстояния до ядра  $r$ . Покажите на графике (в масштабе), какие значения  $r$  будут соответствовать стационарным орбитам. Как из этого графика определить потенциал ионизации атома водорода и первый потенциал возбуждения?

**4.92.** Считая ядро неподвижным, вычислите для атома водорода и ионов  $\text{He}^+$  и лития  $\text{Li}^{2+}$ : а) радиусы  $r_1$  и  $r_2$  первых двух боровских орбит и скорости электрона  $v_1$  и  $v_2$  на этих орбитах; б) напряженность электрического поля ядра на первой боровской орбите; в) кинетическую энергию электрона и энергию связи в основном состоянии; г) первый потенциал возбуждения и длину волны резонансной линии; д) магнитный момент электрона на первой боровской орбите и его отношение к моменту импульса.

**4.93.** Определите (в длинах волн) спектральные диапазоны, соответствующие сериям Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэккета и Пфунда. Изобразите на шкале длин волн их расположение относительно друг друга.

**4.94.** В спектрах некоторых звезд наблюдается  $m \approx 30$  линий водородной серии Бальмера. При каком наименьшем числе штрихов ди-

фракционной решетки  $N$  можно «разрешить» эти линии в спектре первого порядка?

**4.95.** Какие спектральные линии появятся при возбуждении атомарного водорода электронами с энергией в 12,5 эВ?

**4.96.** С какой минимальной скоростью должен двигаться атом водорода, чтобы в результате неупругого лобового соударения с другим, покоящимся, атомом водорода, один из них испустил фотон, если до соударения оба атома находились в основном состоянии?

**4.97.** Определите скорость  $v_1$ , которую приобретает покоящийся атом водорода в результате излучения фотона при переходе электрона из первого возбужденного состояния в основное. На сколько процентов отличается энергия испущенного фотона от энергии данного перехода? С какой скоростью  $v_2$  должен двигаться навстречу наблюдателю атом водорода, чтобы доплеровское смещение частоты для того же перехода было того же порядка величины, что и эффект «отдачи»?

**4.98.** Искусственные спутники Земли, движущиеся по невысоким орбитам, имеют скорости  $v \approx 8$  км/с. Может ли атом водорода, упруго отразившись от спутника, ионизовать при своем дальнейшем движении в атмосфере атом того же типа?

**4.99.** В спектре водородоподобного иона известны длины волн трех линий, принадлежащих к одной и той же серии: 99,2, 108,5 и 121,5 нм. Какие спектральные линии можно предсказать еще? Какому иону принадлежит этот спектр, если известно, что первая спектральная линия – это наиболее коротковолновая линия в серии?

**4.100.** Энергия связи электрона в атоме гелия равна 24,6 эВ. Найдите энергию, необходимую для удаления обоих электронов из этого атома. Проанализируйте полученный результат и докажите, что значение энергии связи определяется взаимодействием электрона как с ядром, так и со вторым электроном.

**4.101.** Выразите постоянную Ридберга: а) для бесконечно тяжелого ядра атома с одним электроном через фундаментальные постоянные; б) для водородоподобного атома через фундаментальные постоянные и массу его ядра  $M_{\text{я}}$ .

**4.102.** Вблизи спектральной линии водорода ( $\lambda_1 = 486,1320$  нм) американский физик Г. Юрг в 1932 г. обнаружил близкую линию ( $\lambda_2 = 485,9975$  нм). Предполагая, что эта линия обусловлена небольшой примесью к обычному водороду его изотопа, определите относительную молекулярную массу этого изотопа.

**4.103.** Отрицательные мюоны могут захватываться атомом и замещать в нем электроны электронной оболочки. Практически может замещаться в нем лишь один электрон. Получающиеся в результате такой замены системы называются мезоатомами. Масса мюона  $m_{\mu} = 207 m_e$ . Вычислите по теории Бора радиус  $r_1$  первой орбиты мюона в

мезоатоме водорода. Определите число оборотов  $N$ , которое успеет совершить мюон до своего  $\beta$ -распада (среднее время жизни мюона  $\tau = 2,2$  мкс).

**4.104.** Найдите для позитрония (система из электрона и позитрона, вращающаяся вокруг центра инерции): а) расстояние между частицами в основном состоянии; б) энергию ионизации и первый потенциал возбуждения; в) постоянную Ридберга и длину волны резонансной линии.

**4.105.** Используя метод размерностей, составьте из постоянной Планка  $h$ , массы электрона  $m_e$  и заряда электрона  $e$  выражения для величин, имеющих размерность длины и энергии. Что это за величины?

**4.106.** Найдите отношение ( $\alpha$ ) энергии электростатического отталкивания двух электронов, находящихся на расстоянии, равном комптоновской длине волны электрона ( $\Lambda = \frac{h}{mc}$ ), к энергии покоя электрона. Значение какой постоянной определяется таким образом? Что характеризует эта постоянная?

**4.107.** Выразите радиусы  $r_n$  и энергии  $E_n$  стационарных состояний атома водорода, а также скорости электрона в этих состояниях через постоянную тонкой структуры  $\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0\hbar c$ .

### 4.3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ

**4.108.** Проанализируйте такой мысленный эксперимент. На пути электронного луча (в электронно-лучевой трубке) помещают регулируемую щель. Как будет изменяться размер следа электронов на экране трубки при изменении ширины щели?

**4.109.** Если в условиях опыта (см. задачу 4.108) экран заменить фотопластинкой, а интенсивность электронного пучка уменьшить настолько, что в каждый момент времени через трубку будет пролетать лишь один электрон, то как будет выглядеть после проявления картина на фотопластинке при разной продолжительности экспозиции? (Считать, что каждый электрон оставляет свой точечный отпечаток на фотопластинке.)

**4.110.** Можно ли для дифракционных опытов с электронами использовать дифракционные оптические решетки?

**4.111.** В опытах Дэвиссона и Джермера по дифракции электронов узкий пучок электронов, ускоренных разностью потенциалов 200 В, падал нормально на поверхность монокристалла никеля. Под каким углом к нормали наблюдался максимум брэгговского отражения четвертого порядка, если соответствующее межплоскостное расстояние равно 0,21 нм?

**4.112.** Для выделения параллельного пучка электронов с энергией  $10^4$  эВ в опытах Томсона по определению заряда электрона использовалась щель шириной  $l = 0,5$  мм. Сказывались ли при этом дифракционные эффекты? При какой ширине щели эти эффекты оказываются определяющими?

**4.113.** Покажите, что измерение координаты  $x$  частицы с помощью узкой щели шириной  $\Delta x$  вносит неопределенность в ее импульс  $\Delta p$ , такую, что  $\Delta x \Delta p \approx \hbar$ .

**4.114.** Оцените наименьшие погрешности, с которыми можно определить скорость электрона, протона и атома урана, если локализовать их в области размером 1 мкм.

**4.115.** На примере дифракции электрона на щели покажите связь между соотношением неопределенностей Гейзенберга и волновыми свойствами электрона.

**4.116.** Параметры заряженной частицы (например, электрона) можно определить, измеряя радиус кривизны трека частицы, зафиксированного с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле. При этом обычно пользуются формулами макроскопической электродинамики и классической механики. Следует ли при расчете учитывать принцип неопределенностей?

**4.117.** Необходимо ли учитывать соотношение неопределенностей при расчете смещения луча, возникающего при пролете электронов в электрических полях горизонтально и вертикально отклоняющих пластин в электронном осциллографе?

**4.118.** Релятивистская частица с массой покоя  $m$  имеет кинетическую энергию  $E_k$ . Найдите: а) дебройлевскую длину волны частицы; б) значения кинетической энергии, при которых погрешность в длине волны, определяемой по нерелятивистской формуле, не превышает для электрона и протона 1,0%.

**4.119.** Найдите групповую и фазовую скорости волн де Бройля для электронов, движущихся со скоростью  $v$ . Может ли волновой пакет, состоящий из совокупности волн де Бройля, оставаться неизменным в пространстве достаточно длительное время?

**4.120.** Узкий пучок моноэнергетических электронов падает под углом скольжения  $\theta = 30^\circ$  на естественную грань монокристалла алюминия. Расстояние между соседними кристаллографическими плоскостями, параллельными этой грани монокристалла,  $d = 0,20$  нм. При некотором ускоряющем напряжении  $U_0$  наблюдают максимум зеркального отражения. Найдите  $U_0$ , если известно, что следующий максимум зеркального отражения возникает при увеличении ускоряющего напряжения в  $n = 2,25$  раза.

**4.121.** При каком значении кинетической энергии электрона его дебройлевская длина волны равна комптоновской длине волны?

**4.122.** При уменьшении энергии электрона на 300 эВ его дебройлевская длина волны изменилась в два раза. Найдите первоначальные энергию и длину волны де Бройля электрона.

**4.123.** Протон с длиной волны  $\lambda = 1,7$  пм упруго рассеялся под углом  $90^\circ$  на первоначально покоившейся частице, масса которой в  $n = 4,0$  раза больше массы протона. Определите длину волны де Бройля рассеянного протона. Можно ли считать этот протон релятивистским?

**4.124.** Свободный электрон в начальный момент времени был локализован в области размером  $l = 10^{-8}$  см. Оцените промежуток времени, за который ширина соответствующего волнового пакета увеличится в  $n = 100$  раз.

**4.125.** Для получения медленных нейтронов пучок быстрых нейтронов из атомного реактора пропускают через блок прессованного графита. При этом все нейтроны, которым соответствует длина волны де Бройля, меньшая 0,67 нм, испытывают интерференционное (брэгговское) отражение. Какой максимальной температуре соответствует скорость медленных нейтронов и чему равна постоянная решетки графита?

**4.126.** Электронный микроскоп позволяет получить изображение деталей, линейные размеры  $d$  которых удовлетворяют условию  $d \gg \lambda(2A)$ , где  $\lambda$  – длина волны де Бройля электронов,  $A$  – числовая апертура микроскопа. Найдите  $d$ , если электроны прошли ускоряющую разность потенциалов  $U = 100$  кВ, а числовая апертура микроскопа равна 0,15.

**4.127.** Покажите, что концепция боровских орбит несовместна с соотношением неопределенностей.

**4.128.** Оцените энергию основного состояния атома водорода, исходя из соотношения неопределенностей.

**4.129.** По гипотезе де Бройля стационарные состояния электрона в атоме водорода соответствуют следующему условию: на орбите электрона должно укладываться целое число волн де Бройля. Покажите, что этому условию соответствует правило квантования моментов, предложенное Бором в его модели атома.

**4.130.** Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию электрона в прямоугольной одномерной потенциальной яме шириной  $l$ .

**4.131.** Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию, которую имеют атомы гелия в жидком состоянии. Сравните ее с энергией хаотического движения атомов гелия. Температура кипения жидкого гелия при атмосферном давлении составляет 4,2 К. Объясните, почему жидкий гелий при понижении температуры не переходит в твердое состояние.

**4.132.** Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию гармонического осциллятора. Какие физические

явления могут быть обусловлены так называемыми «нулевыми» колебаниями?

**4.133.** Среднее время жизни изолированного атома в возбужденном состоянии составляет около  $\Delta t = 10^{-8}$  с. При переходе атома в нормальное состояние испускается фотон, средняя длина волны которого  $\lambda = 500$  нм. Оцените ширину  $\Delta\lambda$  и относительную ширину  $\Delta\lambda/\lambda$  излучаемой спектральной линии, если не происходит уширения ее за счет других процессов (такая ширина называется естественной шириной спектральной линии).

**4.134.** Оцените, исходя из соотношения неопределенностей, минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области с линейными размерами, сопоставимыми с диаметром ядра ( $\sim 10^{-15}$  м). При расчете воспользоваться релятивистской формулой, связывающей энергию и импульс электрона. Какой вывод можно сделать из этой оценки?

**4.135.** Частица массой  $m$  находится в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками ( $0 < x < l$ ). Найдите: а) собственные значения энергии; б) нормированные волновые функции; в) вероятность нахождения частицы в области  $l/3 < x < 2l/3$  для наименьшего стационарного состояния; г) число энергетических уровней в интервале  $(E, E \pm dE)$ .

**4.136.** Частица массой  $m$ , имеющая энергию  $E$ , налетает на бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой  $U_0$ . 1. Найдите коэффициенты отражения и прозрачности барьера, если  $E > U_0$ . 2. Найдите коэффициент отражения, если  $E < U_0$ . Какой вид имеют волновые функции до и после барьера при  $E < U_0$  и  $E > U_0$ ? В чем разница в классическом и квантовом рассмотрении этой задачи?

**4.137.** Частица массой  $m$ , имеющая энергию  $E$ , налетает на потенциальный барьер высотой  $U_0$  конечной ширины  $l$ . Найдите коэффициент прозрачности барьера при  $E < U_0$ . Объясните, почему туннельный эффект не противоречит закону сохранения энергии.

**4.138.** Электрон с энергией  $1,0 \cdot 10^3$  эВ влетает в поле электрического конденсатора, заряженного до напряжения  $2 \cdot 10^3$  В. Расстояние между пластинами конденсатора  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м. Направление скорости совпадает с направлением линий напряженности электрического поля. Найдите вероятность пролета электрона через конденсатор.

**4.139.** Хорошо известно явление термоэлектронной эмиссии, когда при высокой температуре металла в нем оказывается достаточно много быстрых электронов, преодолевающих потенциальный барьер на границе металла с другой средой. Однако опыт показывает, что эмиссия может происходить и из холодного металла, если между средой и металлом создать сильное электрическое поле, линии напряженности которого перпендикулярны поверхности металла и направлены к ней. Дайте качественное объяснение этого явления, учитывая, что в металл это поле не проникает и барьер сохраняется.

**4.140.** Известно явление контактной разности потенциалов при сближении двух разных металлов до расстояния  $10^{-8} \dots 10^{-7}$  см. Рассмотрите процесс ее установления. При этом можно приближенно считать, что электроны в металле ведут себя как газ из невзаимодействующих частиц в свободном от поля пространстве и удерживаются в нем силами отталкивания, возникающими при приближении к поверхности металла, т.е. металл можно рассматривать как потенциальную яму, в которой заперты электроны, а зазор между металлами – как узкий потенциальный барьер.

#### 4.4. КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. СЛОЖНЫЕ АТОМЫ

**4.141.**  $\Psi$ -функция основного состояния атома водорода имеет вид  $\Psi_1 = C e^{-r/a_1}$ , где  $a_1 = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2}$  – радиус первой боровской орбиты. На каком расстоянии от ядра вероятность обнаружения электрона  $P_r$  максимальна? Нарисуйте графики зависимости  $|\Psi_1|^2$  и  $P_r$  от  $r$ .

**4.142.** В нерелятивистской теории квантовое состояние электрона в атоме водорода описывается квантовыми числами  $n$ ,  $l$ ,  $m$ . Какой физический смысл имеют эти числа? Почему квантовое число  $m$  называется магнитным квантовым числом?

**4.143.** Докажите, что число состояний, отвечающих одному главному квантовому числу  $n$ , равно  $2n^2$ .

**4.144.** В сосуде с высоким вакуумом создан узкий пучок атомов водорода, который проходит через сильное неоднородное магнитное поле, что достигается специальной формой полюсных наконечников (один выполняется в виде призмы с острым углом, а в другом вытачивается канавка, параллельная ребру призмы) и попадает на фотопластинку. Опыт показывает, что в таком магнитном поле узкий след пучка преобразуется в двойной. Какова причина этого явления? Можно ли наблюдать подобное явление для пучка свободных электронов?

**4.145.** Спектральные линии щелочных металлов, например желтая линия натрия, представляют собой дублеты (состоят из двух очень близких линий). Какова причина расщепления этих линий?

**4.146.** Резонансная линия натрия состоит из двух компонент (589 и 589,6 нм); для цезия соответствующие значения длин волн равны 894,4 и 852,1 нм. Найдите расщепление соответствующих уровней энергии для натрия и цезия в электронвольтах и сравните их.

**4.147.** Постройте энергетический спектр водорода с учетом тонкой структуры и покажите стрелками возможные переходы между состояниями с  $n = 1$  и  $n = 2$ , а также с  $n = 2$  и  $n = 3$ .

**4.148.** Расстояние между двумя компонентами резонансной линии водорода составляет  $\Delta\lambda = 5,3 \cdot 10^{-4}$  нм. Какой разрешающей способностью должен обладать спектральный прибор для наблюдения этого дублета?

**4.149.** В космическом радиоизлучении водорода в 1951 г. была открыта линия с длиной волны  $\lambda = 21$  см. Между какими состояниями осуществляется этот переход?

**4.150.** Установите, какие из перечисленных переходов в спектре атомов запрещены правилами отбора:  ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ ,  ${}^3P_1 \rightarrow {}^2S_{1/2}$ ,  ${}^3F_3 \rightarrow {}^3P_2$ ,  ${}^4F_{1/2} \rightarrow {}^4D_{5/2}$ .

**4.151.** С помощью периодической системы элементов Д.И. Менделеева рассмотрите порядок «застройки» оболочек атомов. В каком месте системы (при каком  $Z$ ) начинается отклонение от простейшего порядка «застройки»?

**4.152.** У атома какого элемента заполнены  $K$ -,  $L$ -,  $M$ -оболочки,  $4s$ -подоболочка и наполовину  $4p$ -подоболочка?

**4.153.** Если с помощью быстрых электронов выбивать электроны из  $K$ -,  $L$ -, или  $M$ -оболочки атомов, то можно получить характеристические рентгеновские спектры. Отличаются ли заметным образом спектры свободных атомов от спектров таких же атомов, входящих в молекулы? Почему? Как выглядят эти спектры и каким закономерностям подчиняются?

**4.154.** Закон Мозли, определяющий частоту рентгеновского излучения, испускаемого атомами, по виду напоминает формулу Бальмера для спектральных серий водородоподобных атомов. Укажите причины этого сходства. В чем состоит принципиальное отличие оптических спектров элементов от их рентгеновских спектров?

**4.155.** Энергии связи валентного электрона атома лития в состояниях  $2s$  и  $2p$  равны соответственно 5,39 и 3,54 эВ. Вычислите ридберговские поправки для  $S$ - и  $P$ -термов этого атома.

**4.156.** Найдите энергию связи валентного электрона в основном состоянии атома лития, если длина волны головной линии резкой серии  $\lambda_1 = 813$  нм и длина волны коротковолновой границы этой серии  $\lambda_2 = 350$  нм.

**4.157.** Определите длину волны  $K_\alpha$ -линии элемента периодической системы, начиная с которого следует ожидать появления  $L$ -серии характеристического излучения.

**4.158.** Определите напряжение на рентгеновской трубке с никелевым антикатодом, если разность длин волн  $K_\alpha$ -линии и коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра равна 0,084 нм.

**4.159.** При каком напряжении на рентгеновской трубке с антикатодом из ванадия следует ожидать появления  $K_\alpha$ -линии излучения ванадия?

4.160. При облучении углерода излучением  $K_{\alpha}$ -линии алюминия возникает спектр фотоэлектронов, содержащий несколько моноэнергетических групп. Найдите энергии этих групп.

4.161. Какой вид имеет спектр поглощения вольфрама в рентгеновском диапазоне длин волн? Нарисуйте вид спектра и укажите на нем положение  $K_{\alpha}^{-}$ ,  $K_{\beta}^{-}$ ,  $K_{\gamma}$ -линий излучения.

4.162. Покажите, что число атомов, возбужденных на некоторый уровень, убывает со временем по закону  $N = N_0 e^{-t/\tau}$ , где  $\tau$  – среднее время жизни на этом уровне.

4.163. Газоразрядная трубка заполнена парами лития. При температуре паров  $T = 1500$  К и общем числе атомов лития в трубке  $N = 3,0 \cdot 10^{16}$  мощность излучения резонансной линии  $\lambda = 670,8$  нм, соответствующей переходу  $2P \rightarrow 2S$ , равна  $P = 0,25$  Вт. Найдите среднее время жизни атома лития в состоянии резонансного возбуждения.

4.164. Спектральная линия ( $\lambda = 532,0$  нм) возникает в результате перехода между двумя возбужденными состояниями атома, среднее время жизни в которых равно 12 и 20 нс. Оцените естественную ширину  $\Delta\lambda$  этой линии.

4.165. В какой области спектра теплового излучения при температуре 300 К интенсивность индуцированного излучения превосходит интенсивность спонтанного?

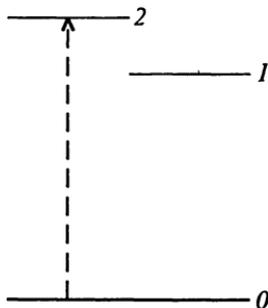


Рис. 4.4

4.166. Покажите, что с помощью «оптической накачки» нельзя получить инверсное заселение верхнего уровня в двухуровневой системе.

4.167. Пусть в квантовой системе, состоящей из трех уровней (рис. 4.4) производится «накачка» на уровень 2, причем обратный переход возможен только через уровень 1. Покажите, что в этом случае усиление света с частотой  $\omega_{21}$  возможно при условии  $g_1 A_{10} > g_2 A_{21}$ , где  $g_1$  и  $g_2$  – статистические веса уровней 1 и 2,  $A_{10}$  и  $A_{21}$  – коэффициенты Эйнштейна

для соответствующих спонтанных переходов.

4.168. Пусть  $q$  – число атомов, возбуждаемых в единицу времени на уровень 2 (см. рис. 4.4). Найдите число атомов на уровне 1 через промежуток времени  $t$  после начала возбуждения. Коэффициенты Эйнштейна  $A_{20}$ ,  $A_{21}$  и  $A_{10}$  предполагаются известными. Индуцированными переходами пренебречь.

4.169. Система атомов находится в термодинамическом равновесии со своим излучением при температуре  $T$ . Пусть переходу между двумя энергетическими уровнями атомов  $E_1$  и  $E_2$  со статистическими весами  $g_1$  и  $g_2$  соответствует частота  $\nu$  и коэффициенты Эйнштейна  $A_{21}$ ,  $B_{21}$ ,

$B_{12}$ . Найдите выражение для объемной спектральной плотности энергии теплового излучения; определите также связь между коэффициентами Эйнштейна.

4.170. Атомарный водород находится в термодинамическом равновесии со своим излучением. Вычислите отношение вероятностей индуцированного и спонтанного излучения атомов при переходе с уровня  $2p$  на уровень  $1s$  при температуре  $T = 3000$  К и температуру, при которой эти вероятности будут одинаковы.

4.171. В трубке гелий-неонового лазера без зеркал возбуждают электрический разряд и наблюдают спонтанное излучение возбужденных атомов газа. Велика ли интенсивность излучения в линии с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм, на которой обычно работает гелий-неоновый лазер, по сравнению с другими линиями спектра? От чего зависит интенсивность различных линий в спектре?

4.172. Какие характеристики газового лазера зависят от качества зеркал (их коэффициента отражения), от расстояния между ними, температурного коэффициента линейного расширения станины лазера, на которой крепятся зеркала, от давления газа в трубке?

4.173. Какова расходимость пучка гелий-неонового лазера, если диаметр пучка на выходе лазера составляет  $d = 2$  мм?

4.174. Сравните ширину линии излучения гелий-неонового лазера с шириной этой линии в спектре газового разряда неона. Объясните, почему они отличаются.

4.175. Известно, что степень поляризации излучения при прохождении света через диэлектрик при угле падения, равном углу Брюстера, незначительна. Почему же постройка «окон Брюстера» в газовом лазере приводит к полной поляризации излучения лазера?

4.176. Каким образом достигается поляризация излучения в лазере на рубине?

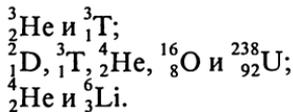
## 4.5. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### Радиус, масса, энергия связи ядер

4.177. Оцените плотность ядерного вещества  $\rho_m$ , концентрацию нуклонов  $n$  и объемную плотность электрического заряда  $\rho_q$ .

4.178. Объясните, почему относительные атомные массы естественных элементов, приведенные в периодической системе элементов Менделеева, не целочисленны, хотя ядра состоят из целого числа протонов и нейтронов.

4.179. Сравните энергии связи следующих ядер:



Какие выводы можно сделать о свойствах ядерных сил из этих сравнений?

**4.180.** Спины ядер бора  ${}^{10}_5\text{B}$ , лития  ${}^6_3\text{Li}$  и других целочисленны. Какими должны были бы быть спины этих ядер при электрон-протонной модели ядра?

**4.181.** Покажите, что электрон-протонная модель ядра не удовлетворяет соотношению неопределенностей Гейзенберга.

**4.182.** Найдите энергию связи: а) нейтрона и  $\alpha$ -частицы в ядре  ${}^{21}\text{Ne}$ ; б) энергию, необходимую для разделения ядра  ${}^{16}\text{O}$  на четыре одинаковых частицы.

**4.183.** Найдите энергию возбуждения ядра  ${}^{207}\text{Pb}$ , возникающего при захвате ядром  ${}^{206}\text{Pb}$  медленного нейтрона.

**4.184.** Найдите энергию, необходимую для разделения ядра  ${}^{16}\text{O}$  на  $\alpha$ -частицу и ядро  ${}^{12}\text{C}$ , если известно, что энергии связи ядер  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^4\text{He}$  равны 127,62; 92,16 и 28,30 МэВ соответственно.

**4.185.** Вычислите разность энергий связи зеркальных ядер  ${}^{33}\text{S}$  и  ${}^{33}\text{Cl}$ , если известно, что масса атома  ${}^{33}\text{S}$  меньше массы атома  ${}^{33}\text{Cl}$  на 0,00599 а.е.м. Сравните полученное значение с разницей в энергиях электростатического кулоновского отталкивания протонов в этих ядрах, считая распределение заряда в ядре равномерным.

**4.186.** Считая, что разность энергий связи зеркальных ядер  ${}^{23}\text{Na}$  и  ${}^{23}\text{Mg}$  определяется различием только энергий кулоновского отталкивания, вычислите их радиусы. Сравните полученный результат с вычисленным по формуле для радиуса ядра.

**4.187.** Оцените характерное ядерное время (время пролета нуклона через ядро), считая радиус ядра и скорость нуклонов в ядре соответственно равными  $5 \cdot 10^{-14}$  м и  $10^7$  м/с. Почему это время является важным масштабным временем в ядерной физике?

**4.188.** Природный изотоп углерода состоит в основном из изотопов  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{13}\text{C}$ . Взяв из периодической системы элементов Д. И. Менделеева относительную атомную массу природного углерода, найдите, какой процент (по массе) составляет изотоп  ${}^{13}\text{C}$  в природном углероде. Массы атомов обоих изотопов считать известными.

**4.189.** Рассмотрите с энергетической точки зрения возможность деления очень массивного ядра, например урана  ${}^{235}\text{U}$ , или ядра, соответствующего средней части таблицы Менделеева, на два более легких ядра. Рассмотрите аналогичным образом возможность синтеза ядра из двух более легких ядер, например ядра гелия He из ядер изотопов водорода, и ядра тяжелого элемента из двух ядер, соответствующих средней части таблицы Менделеева.

4.190. Какова разность между массой атома водорода и суммой масс протона и электрона?

4.191. Определите, при каком заряде  $Z$  радиус  $K$ -оболочки атома оказывается порядка радиуса ядра? Этим ли определяется естественный предел номера трансурановых элементов? При расчете считать,

$$\text{что } Z = \frac{A}{1.97 + 0,015A^{2/3}}.$$

### Радиоактивность

4.192. Ампула с ураном очень долгое время остается теплее окружающей среды и в ней самопроизвольно образуются атомы других химических веществ. С какими превращениями в атомах это связано? За счет какой энергии повышается температура ампулы? Зависят ли результаты подобных опытов от внешних условий (температуры и др.) и от того, входят ли атомы урана в какие-либо соединения?

4.193. Радиоактивное излучение распространяется в области пространства, где действует сильное магнитное поле. Какие виды траекторий могут наблюдаться? Почему?

4.194. В каких из трех случаев изменяются химические свойства атомов: при  $\alpha$ -,  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучении?

4.195. Какие фундаментальные законы отражают так называемые правила смещения для радиоактивных превращений элементов?

4.196. При различных процессах, происходящих с атомными ядрами, испускаются  $\gamma$ -кванты. Чем объясняется дискретность спектра этих  $\gamma$ -квантов?

4.197. Свидетельствует ли  $\beta$ -распад, что электроны входят в состав ядра?

4.198. При  $\alpha$ -распадах ядер обычно наблюдается несколько моноэнергетических групп  $\alpha$ -частиц, имеющих различные энергии. Какие выводы о возможных моделях ядра можно сделать из результатов этих экспериментов?

4.199. Как из анализа кривой распределения  $\beta$ -электронов по энергиям (рис. 4.5) можно оценить массу покоя нейтрино?

4.200. Объясните качественно, почему нет нейтронной радиоактивности, практически не на-

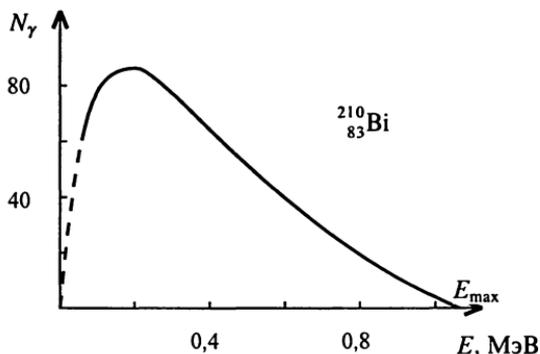


Рис. 4.5.

блюдается протонная радиоактивность и в то же время существует  $\alpha$ -радиоактивность.

**4.201.** Почему при делении атомного ядра все осколки деления  $\beta^-$ -радиоактивны, а не  $\beta^+$ -радиоактивны?

**4.202.** Почему от Солнца идет поток нейтрино, а все реакторы деления атомных ядер являются источниками антинейтрино?

**4.203.** Какова вероятность  $P$  распада радиоактивного ядра за промежуток времени  $t$ , если его постоянная распада равна  $\lambda$ ?

**4.204.** Докажите, что среднее время жизни радиоактивных ядер  $\tau = 1/\lambda$ , где  $\lambda$  – их постоянная распада.

**4.205.** Имеется пучок нейтронов с кинетической энергией 0,025 эВ. Какая доля нейтронов распадается на длине пучка 2,0 м?

**4.206.** Найдите активность препарата изотопа радия  $^{226}\text{Ra}$  массой 1 г. Период полураспада радия  $^{226}\text{Ra}$  1620 лет.

**4.207.** Определите активность ядер в свежеприготовленном препарате брома  $^{82}\text{Br}$ , если известно, что через сутки его активность стала равной  $7,4 \cdot 10^9$  Бк.

**4.208.** В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего радиоизотоп натрия  $^{24}\text{Na}$  активностью  $2,0 \cdot 10^3$  Бк. Активность крови, взятой в объеме  $1 \text{ см}^3$  через 5,0 ч после этого, оказалась 0,27 Бк. Найдите объем крови человека.

**4.209.** Чтобы определить возраст  $t$  древней ткани, найденной в одной из египетских пирамид, определили активность в ней атомов радиоуглерода  $^{14}\text{C}$ . Оказалось, что в 1 г углерода в 1 мин происходит 9,2 распада ядер. В живых растениях, содержащих углерод  $^{14}\text{C}$ , происходит 14,0 распадов в 1 мин на 1 г углерода. Период полураспада  $^{14}\text{C}$  равен 5730 лет. Исходя из этих данных оцените  $t$ .

**4.210.** В некоторых урановых рудах содержится примесь чистого уранового свинца  $^{206}\text{Pb}$ . Предполагая, что весь свинец получился в результате распада урана и его продуктов, определите возраст  $t$  урановой руды. Принять, что в настоящее время в 1 г руды содержится 0,2 г свинца.

**4.211.** В настоящее время в природном уране содержится 99,28% изотопа урана  $^{238}\text{U}$  и 0,72% изотопа урана  $^{235}\text{U}$ . Какое соотношение по массе между этими изотопами было в момент образования Земли, если возраст Земли  $4 \cdot 10^9$  лет? Периоды полураспада  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  соответственно равны  $4,51 \cdot 10^9$  лет и  $7,13 \cdot 10^8$  лет.

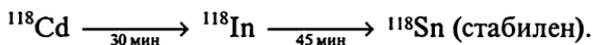
**4.212.** Период полураспада изотопа урана  $^{234}\text{U}$   $T = 2,48 \cdot 10^5$  лет. Остался ли хотя бы один атом  $^{234}\text{U}$ , который существовал в момент образования Земли –  $4 \cdot 10^9$  лет тому назад? Как объяснить, что в природном уране содержится примесь  $^{234}\text{U}$  в количестве 0,055%?

**4.213.** В современной теории протон считается абсолютно устойчивой частицей. Действительно, протон – самый легкий адрон. Его рас-

пад означал бы, что закон сохранения барионного заряда нарушается, например в реакции  $p \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . Тем не менее физики в течение ряда лет со все возрастающей точностью эксперимента ищут именно этот распад. Для этого они изучают появление  $\mu^+$  в глубоких пещерах, в которые не могут проникнуть мюоны от космических лучей. До сих пор реакция распада не зарегистрирована. Исходя из точности эксперимента можно показать, что время жизни протона более  $10^{30}$  лет. Усилия экспериментаторов поддерживает надежда проверить новую, единую теорию всех типов сил с одной константой взаимодействия (теория «великого объединения»). В этой теории время распада протона  $\tau = 10^9$  лет. Предположив, что теория великого объединения верна, рассчитайте, сколько протонов распадется за 1 мин в  $1 \text{ км}^3$  воды.

**4.214.** При  $\beta$ -распаде изотопа палладия  $^{112}\text{Pd}$  возникает  $\beta$ -активный изотоп серебра  $^{112}\text{Ag}$ . Их периоды полураспада равны соответственно 21 и 3,2 ч. Найдите отношение максимальной активности второго изотопа к первоначальной активности препарата, если в начальный момент препарат содержал только первый радиоизотоп.

**4.215.** Радиоизотоп кадмия  $^{118}\text{Cd}$  испытывает превращения по цепочке:



Под стрелками указаны периоды полураспада. Считая, что в начальный момент  $t = 0$  препарат содержал только ядра кадмия, найдите: а) долю ядер кадмия, превратившихся в стабильные ядра олова за 60 мин; б) закон изменения со временем числа ядер кадмия и индия.

**4.216.** Заданы исходные и конечные элементы четырех радиоактивных семейств:



Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений произошло в каждом семействе?

**4.217.** Кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, вылетающей из ядра атома радия при радиоактивном распаде, равна  $E_\alpha = 4,78$  МэВ. Найдите скорость  $v$  частицы и полную энергию  $E$ , выделяющуюся при ее вылете.

**4.218.** Изотоп урана  $^{238}\text{U}$  массой 1 г в равновесии с продуктами его распада выделяет мощность  $1,07 \cdot 10^{-7}$  Вт. Найдите полное количество теплоты, выделяемое 1 моль урана за среднюю продолжительность жизни атомов урана.

**4.219.** Оцените высоту  $U_0$  кулоновского барьера для  $\alpha$ -частиц, испускаемых ядрами изотопа радона  $^{222}\text{Rn}$  (закруглением вершины барьера пренебречь). Какова у этих ядер ширина  $l$  барьера для  $\alpha$ -частиц, вылетающих с кинетической энергией 5,5 МэВ?

4.220. Найдите отношение коэффициентов прозрачности барьера для  $\alpha$ -частиц, испускаемых ядрами изотопа тория  $^{228}\text{Th}$ , если их кинетические энергии соответственно равны 6,63 и 6,62 МэВ. Покажите, что коэффициент прозрачности барьера  $D$  равен  $D = e^{-\kappa\sqrt{r}}$ , где  $\kappa = 2\pi Ze^2\sqrt{2m}/\hbar$ .

4.221. Распад ядер изотопа полония  $^{210}\text{Po}$  происходит из основного состояния и сопровождается испусканием двух групп  $\alpha$ -частиц: одной с энергией 5,30 МэВ и другой с энергией 4,5 МэВ. Найдите энергию  $E_1$   $\alpha$ -распада этих ядер и энергию  $E_\gamma$   $\gamma$ -квантов, испускаемых дочерними ядрами.

4.222. При распаде ядер изотопа полония  $^{212}\text{Po}$  испускаются четыре группы  $\alpha$ -частиц: основная с энергией 8,780 МэВ и длиннопробежные с энергиями 9,492, 10,422 и 10,543 МэВ. Рассчитайте и постройте схему уровней энергии ядра  $^{212}\text{Po}$ , если известно, что дочерние ядра во всех случаях возникают непосредственно в основном состоянии.

4.223. Ядро изотопа гелия  $^6\text{He}$  испытало  $\beta$ -распад, в результате которого дочернее ядро оказалось непосредственно в основном состоянии. Энергия распада  $E = 3,50$  МэВ. Под каким углом к направлению вылета электрона испущено антинейтрино, если электрон с кинетической энергией  $E_k = 0,60$  МэВ вылетел под прямым углом к направлению движения ядра отдачи?

4.224. Ядро изотопа углерода  $^{11}\text{C}$  испытывает позитронный распад, в результате которого дочернее ядро оказывается непосредственно в основном состоянии. Вычислите: а) максимальную кинетическую энергию позитронов и соответствующую кинетическую энергию дочернего ядра; б) кинетическую энергию позитрона и нейтрино в том случае, когда дочернее ядро не испытывает отдачи.

## Ядерные реакции

4.225. Рассмотрите возможность использования следующих ядерных превращений для осуществления управляемой термоядерной реакции:

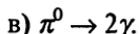
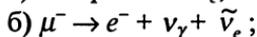
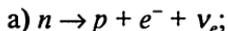
1.  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} = {}^3_1\text{T} + p$ ;
2.  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} = {}^3_2\text{He} + n$ ;
3.  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} = {}^4_2\text{He}$ .

4.226. Две первые реакции (см. задачу 4.225) рассматриваются как основные первичные ядерные реакции, которые могут быть использованы для осуществления управляемой термоядерной реакции. Вычислите энергии этих реакций.

4.227. Плазма, в которой может возникнуть реакция термоядерного синтеза, должна иметь температуру порядка  $10^8$  К. Как можно измерить такую температуру?

4.228. Как соотносятся средняя кинетическая энергия хаотического движения ионов в термоядерной плазме и энергия ионизации атомов легких элементов? Оцените скорость частиц в плазме. Какую индукцию должно иметь магнитное поле, чтобы удержать термоядерную плазму?

4.229. Продемонстрируйте действие законов сохранения на примерах следующих реакций:



4.230. Экзотермическими или эндотермическими являются следующие реакции: а)  $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{16}\text{O} + d$ ; б)  $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^9\text{Be} + \alpha$ ?

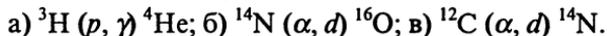
4.231. Альфа-частица с кинетической энергией  $E_{k0} = 1,0$  МэВ упруго рассеялась на покоившемся ядре лития. Определите кинетическую энергию ядра отдачи, отлетевшего под углом  $\theta = 30^\circ$  к первоначальному направлению движения  $\alpha$ -частицы.

4.232. Нерелятивистский нейтрон упруго рассеялся под углом  $\theta_n$  на покоившемся ядре изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ , в результате чего последнее получило импульс, составляющий угол  $60^\circ$  с направлением движения нейтрона. Определите угол  $\theta_n$ .

4.233. Дейтроны с кинетической энергией 0,30 МэВ упруго рассеиваются на протонах. Найдите в лабораторной системе кинетическую энергию дейтронов, рассеянных на максимally возможный угол. Чему равен этот угол?

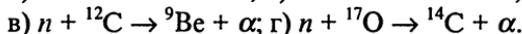
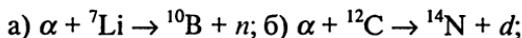
4.234. Почему в атомных реакторах в качестве замедлителей используются графит и тяжелая вода?

4.235. Определите энергетический выход следующих реакций:

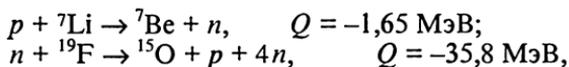


4.236. Найдите скорости продуктов реакции  ${}^{10}\text{B} (n, \alpha) {}^7\text{Li}$ , протекающей в результате взаимодействия медленных нейтронов с покоящимися атомами бора.

4.237. Вычислите пороговые энергии  $\alpha$ -частиц и нейтронов в следующих реакциях:



4.238. Определите кинетические энергии ядер изотопа бериллия  ${}^7\text{Be}$  и изотопа кислорода  ${}^{15}\text{O}$ , возникающих в реакциях:



при пороговом значении энергии протона и нейтрона.

**4.239.** При сгорании 1 кг ядерного (уранового) топлива выделяется энергия  $\approx 7 \cdot 10^7$  Дж. Сколько нефти нужно сжечь для получения такой же энергии? Какое количество топлива расходует в год атомная электростанция мощностью 5000 МВт, если ее КПД равен 20%? Удельная теплота сгорания нефти 46 МДж/кг.

**4.240.** Найдите полный поток нейтрино и уносимую потоком мощность из реактора с тепловой мощностью 20 МВт, считая, что на каждое деление приходится пять  $\beta$ -распадов осколков, для которых суммарная энергия нейтрино составляет около 11 МэВ.

**4.241.** Найдите период полураспада изотопа урана  ${}^{238}\text{U}$  относительно спонтанного деления, если в 1 г чистого урана  ${}^{238}\text{U}$  за 1 ч происходит 25 делений. Сколько  $\alpha$ -распадов за то же время происходит в этом образце?

**4.242.** Какое количество атомов радиоактивного углерода  ${}^{14}\text{C}$  образуется в течение года в атмосфере за счет космических нейтронов в реакции  $n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow p + {}^{14}_6\text{C}$ ? Плотность потока космических нейтронов на высоте 16 км равна  $2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Считать, что все нейтроны, замедлившись в атмосфере, поглощаются азотом воздуха с образованием  ${}^{14}\text{C}$ .

**4.243.** Запишите уравнения ядерных реакций, используемых при получении трансурановых элементов.

**4.244.** Современные ускорители позволяют сообщить протонам энергию порядка 100 ГэВ. С какой скоростью движется такой протон? Сравните полученный результат со скоростью протона, входящего в состав космических лучей и обладающего энергией  $10^{20}$  эВ.

**4.245.** Каковы условия рождения электронно-позитронной пары? Почему в процессе аннигиляции такой пары не может возникнуть один  $\gamma$ -квант?

**4.246.** Почему фотон ( $\gamma$ -квант) не может превратиться в электронно-позитронную пару, не взаимодействуя с какой-либо частицей, например с ядром атома?

**4.247.** Покажите, что комптоновская длина волны электрона определяет по порядку величины предел применимости к электрону нерелятивистской квантовой механики, в которой исключается из рассмотрения рождение пар и другие релятивистские эффекты.

**4.248.** В электрическом поле какой напряженности начнут интенсивно рождаться электронно-позитронные пары, т.е. начнется «пробой» вакуума?

**4.249.** Известно, что мюон ( $m \approx 206,8 m_e$ ) имеет радиус меньше 0,1 фм. Рассчитайте минимально возможную плотность вещества в

мюоне. Сравните ее с минимальной плотностью черной дыры ( $\approx 10^{19}$  кг/м<sup>3</sup>).

4.250. Какую энергию необходимо сообщить электрону для исследования структуры с линейными размерами порядка 1 фм?

4.251. Температура в недрах Солнца  $\approx 10^7$  К. Может ли при этой температуре произойти слияние четырех протонов с образованием ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ ? Считать, что такой процесс возможен, если протоны сблизятся до расстояния  $5 \cdot 10^{-15}$  м.

4.252. В результате термоядерной реакции синтеза в недрах Солнца из четырех атомов водорода образуется один атом  ${}^4_2\text{He}$ . Сколько лет может излучать Солнце, если допустить, что оно состоит только из водорода и он за это время полностью превратится в гелий?

4.253. Пи-мезон ( $m_\pi = 273,1 m_e$ ) распадается на  $\mu$ -мезон ( $m_\mu = 206,8 m_e$ ) и нейтрино. Найдите энергию  $\mu$ -мезона и импульсы  $\mu$ -мезона и нейтрино.

4.254. Какие из реакций запрещены законами сохранения электрического, барионного и лептонного заряда:

- |  |  |
|--|--|
| 1. $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ;           | 5. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ ; |
| 2. $p \rightarrow n + e^+$ ;                           | 6. $K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ ; |
| 3. $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$ ; | 7. $\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$ ; |
| 4. $K^+ \rightarrow \pi^- + 2e^+$ ;                    | 8. $\pi^+ + n \rightarrow K^0 + K^+$ ?       |

4.255. Перечислите строгие законы сохранения при реакциях элементарных частиц, т.е. законы, которые справедливы для всех типов взаимодействий.

## Раздел 5 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

### 5.1. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

5.1. Является ли изолированной системой газ в воздушном шаре? в термостате? в железном баллоне?

5.2. Каковы упрощающие предположения модели идеального газа? Изобразите для идеального газа график зависимости потенциальной энергии молекул от расстояния между ними.

5.3. Каким образом можно экспериментально осуществить изохорный, изобарный и изотермический процессы?

5.4. В термостате находится сосуд, внутри которого имеется подвижный поршень, способный свободно перемещаться в горизонтальном направлении. Слева от поршня находится моль азота, справа – моль водорода. Каким будет соотношение объемов при равновесии?

5.5. Условия предыдущей задачи изменились таким образом, что теперь по разные стороны поршня находятся азот и водород одинаковой массы. Как изменится соотношение объемов при равновесии?

5.6. Как менялась температура газа в круговом процессе, изображенном на рисунке 5.1? Укажите на графике точки, соответствующие наименьшей и наибольшей температуре газа.

5.7. Изменится ли масса воздуха в комнате, если перестанет работать отопление?

5.8. Почему медицинские банки присасываются к телу? Постройте диаграмму процесса в координатах  $p, V$ .

5.9. Когда больше подъемная сила одного и того же аэростата, летом или зимой? Атмосферное давление считать постоянным.

5.10. На рисунках 5.2 и 5.3 изображены диаграммы процессов в координатах  $p, V$ . Представьте эти процессы на графиках в координатах  $p, T$  и  $T, V$ , сохранив нумерацию точек.

5.11. Как меняется внутренняя энергия газа данной массы в изотермическом, изохорном, изобарном процессах? Как при этом меняется

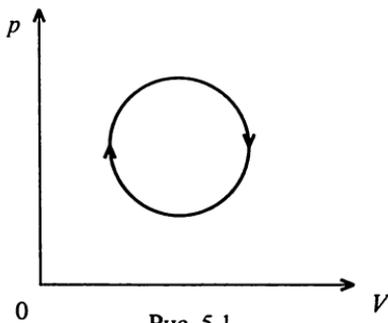


Рис. 5.1

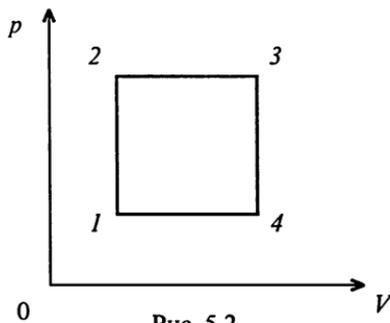


Рис. 5.2

внутренняя энергия единицы объема данного газа? Постройте графики зависимости указанных величин от объема газа.

**5.12.** В результате некоторого квазистатического процесса давление газа возросло вдвое, а объем при этом увеличился в три раза. Как при этом изменились внутренняя энергия газа данной массы и внутренняя энергия единицы объема газа?

**5.13.** Смесь азота и водорода находится в состоянии равновесия. Одинаковы ли импульсы, скорости, энергии молекул водорода и азота?

**5.14.** Плотность какого воздуха больше при нормальных условиях, сухого или влажного?

**5.15.** Средняя относительная молекулярная масса газа в околосолнечном пространстве равна 1,5. Что можно сказать о составе атмосферы Солнца?

**5.16.** Молекула аргона, летящая со скоростью 500 м/с, упруго ударяется о стенку сосуда. Найдите импульс силы, полученный стенкой за время удара, если: а) молекула ударяется нормально; б) направление скорости молекулы составляет угол  $60^\circ$  с нормалью к стенке.

**5.17.** Пучок молекул массой  $m$  с концентрацией  $n$  движется со скоростью  $v$  и ударяется о стенку, упруго отражаясь от нее. Определите число ударов за 1 с о поверхность стенки единичной площади и давление, оказываемое на стенку, если: а) пучок ударяется о стенку нормально; б) направление скорости молекул пучка составляет угол  $\alpha$  с нормалью к стенке.

**5.18.** Стенка (см. задачу 5.17, а) движется со скоростью  $\vec{u}$ . Как изменится давление?

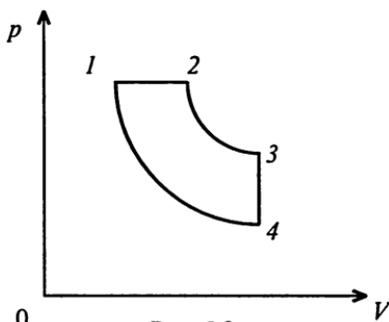


Рис. 5.3

5.19. Сосуд содержит воздух при атмосферном давлении и температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . До какой температуры нужно нагреть этот сосуд, чтобы из него вытеснилась одна пятая часть всех молекул, первоначально находившихся в сосуде?

5.20. Шар радиусом  $1\text{ м}$  заполнен воздухом при нормальных условиях и помещен в безвоздушное пространство. В шаре имеется микротрещина, через которую ежесекундно вылетает миллион молекул. Сколько времени понадобится для того, чтобы вышел весь воздух? Скорость вылета молекул считать постоянной.

5.21. В сосуде находится углекислый газ. При некоторой температуре степень диссоциации молекул углекислого газа на кислород и оксид углерода (II)  $\alpha = 0,25$ . Во сколько раз давление в сосуде при этих условиях больше того давления, которое установилось бы в случае, если бы молекулы углекислого газа не были диссоциированы?

5.22. Можно ли считать, что межзвездное облако, состоящее из нейтрального водорода, ведет себя как идеальный газ? Концентрация частиц в облаке  $n = 10^6\text{ м}^{-3}$ .

5.23. Когда в течение длительного времени автомобиль идет по шоссе, особенно летом, камеры и заполняющий их воздух нагреваются в результате деформаций и трения, а также от соприкосновения с нагретой поверхностью шоссе. На сколько процентов изменится давление в камере, если температура воздуха в камере повысится с  $27$  до  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

5.24. Плотность углекислотной ( $\text{CO}_2$ ) атмосферы Венеры примерно в  $50$  раз выше плотности земной атмосферы при нормальных условиях. Считая, что температура у поверхности Венеры  $477\text{ }^{\circ}\text{C}$ , найдите венерианское атмосферное давление.

5.25. Два студента определяли плотность воздуха. Сначала они взвесили пустой сосуд и нашли, что его масса равна  $20\text{ г}$ . Затем они надули мягкий сферический баллон из пластика до диаметра  $21\text{ см}$  и выдавили его содержимое в сосуд. Масса сосуда с воздухом из баллона оказалась равной  $26,5\text{ г}$ . Чему были равны плотность воздуха и его давление внутри баллона? Температура воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

5.26. Для определения плотности газа поступили следующим образом. Большой стеклянный баллон вместимостью  $V$  был наполнен испытуемым газом до давления  $p_1$  и взвешен. Его масса оказалась равной  $m_1$ . Затем часть газа была удалена, и давление его упало до  $p_2$ . Новая масса баллона  $m_2$ . Какова плотность газа при атмосферном давлении? Температуру в обоих опытах считать одинаковой.

5.27. Тонкостенный резиновый шар (масса оболочки шара  $m_{\text{ш}} = 0,05\text{ кг}$ ) наполнен азотом и погружен в озеро на глубину  $h = 100\text{ м}$ . Найдите массу азота, если шар находится в состоянии равновесия. Будет ли равновесие устойчивым? Атмосферное давление равно  $p_0 = 10^5\text{ Па}$ . Температура в глубине озера  $t = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Натяжением резины пренебречь.

5.28. Баллон вместимостью 20 л наполнен сжатым воздухом. При температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  манометр показывает давление  $p_1 = 1,2 \cdot 10^7$  Па. Какой объем воды можно вытеснить из цистерны подводной лодки воздухом этого баллона, если вытеснение производится на глубине  $h = 30$  м и температура на этой глубине равна  $t_2 = 5^\circ\text{C}$ ? Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па.

5.29. Три баллона, вместимости которых соответственно равны  $V_1 = 3$  дм<sup>3</sup>,  $V_2 = 7$  дм<sup>3</sup>,  $V_3 = 5$  дм<sup>3</sup>, наполнены один кислородом ( $p_1 = 2 \cdot 10^5$  Па), другой азотом ( $p_2 = 3 \cdot 10^5$  Па) и третий – углекислым газом ( $p_3 = 6 \cdot 10^4$  Па) при одной и той же температуре. Баллоны соединяют между собой, причем образуется смесь той же температуры. Каково давление смеси?

5.30. Определите плотность смеси водорода массой 4 г и кислорода массой 32 г при температуре  $7^\circ\text{C}$  и давлении 700 мм рт. ст.

5.31. В баллоне вместимостью 0,5 дм<sup>3</sup> содержится смесь газов, состоящая из  $10^{20}$  молекул кислорода,  $4 \cdot 10^{20}$  молекул азота и  $3,3 \cdot 10^{20}$  молекул аргона. Определите: а) давление смеси; б) молярную массу смеси. Температура смеси  $127^\circ\text{C}$ .

5.32. Сухой атмосферный воздух содержит 22,9% кислорода (от общей массы), 75,8% азота и 1,3% аргона. Доля остальных газов пренебрежимо мала. Определите среднюю относительную молекулярную массу воздуха и парциальные давления составляющих его газов, если атмосферное давление  $10^5$  Па.

5.33. Поверхностная плотность сферической оболочки воздушного шара равна  $\rho_s$ . Шар наполнен гелием при нормальном атмосферном давлении  $p_0 = 10^5$  Па. Каким должен быть минимальный радиус шара, чтобы шар поднял сам себя? Температура гелия и температура окружающего воздуха одинаковы и равны  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Молярную массу воздуха принять равной  $M = 0,029$  кг/моль.

5.34. Объем баллона электрической лампы  $V = 500$  см<sup>3</sup>. Лампа наполнена азотом при давлении  $p = 8 \cdot 10^4$  Па. Какого объема вода войдет в баллон лампы, если его опустить под воду на малую глубину и обломить кончик? Атмосферное давление  $p_0 = 1,05 \cdot 10^5$  Па.

5.35. В запаянной с одного конца стеклянной трубке, длина которой  $L = 70$  см, находится столбик воздуха, запертый сверху столбиком ртути высотой  $h = 20$  см, доходящим до верхнего края трубки. Трубку осторожно переворачивают, причем часть ртути выливается. Определите: а) высоту столбика ртути, которая останется в трубке; б) длину трубки, при которой столбик ртути первоначальной высоты выльется из трубки полностью. Атмосферное давление считать равным 750 мм рт. ст.

5.36. Посередине откачанного и запаянного с обоих концов горизонтального капилляра находится столбик ртути длиной 20 см. Если капилляр поставить вертикально, то столбик ртути переместится на 10 см. До какого давления был откачан капилляр? Длина капилляра 1 м.

5.37. В чашечный ртутный барометр попал пузырек воздуха, вследствие чего барометр показывает давление меньше истинного. При сверке его с точным барометром оказалось, что при давлении  $p_1 = 768$  мм рт. ст. барометр показывает  $p'_1 = 748$  мм рт. ст., причем расстояние от уровня ртути до верхнего основания трубки  $d = 80$  мм. Каково истинное значение давления  $p_2$ , если барометр показывает  $p'_2 = 734$  мм рт. ст., а температура воздуха та же?

5.38. Цилиндрический сосуд длиной  $l = 84$  см, расположенный горизонтально, разделен на две равные части теплонепроницаемым поршнем. В обеих половинах сосуда находятся одинаковые массы газа при температуре  $t_0 = 27$  °С и давлении  $p_0 = 10^5$  Па. На какое расстояние  $x$  от середины сосуда сместится поршень, если газ в одной из половин нагреть до  $t_1 = 57$  °С? Какое давление установится при этом в сосуде? Считать, что в другой половине сосуда температура не изменяется.

5.39. Из баллона со сжатым водородом объемом  $V = 10$  л вследствие неисправности вентиля вытекает газ. При температуре  $t_1 = 7$  °С манометр показывал  $p = 4,9 \cdot 10^6$  Па. Через некоторое время при температуре  $t_2 = 17$  °С манометр показал такое же давление. Сколько газа вытекло?

5.40. Баллон с азотом, масса которого  $m_1 = 1$  кг, при испытании взорвался при температуре  $t_1 = 350$  °С. Сколько водорода можно хранить в этом баллоне при температуре  $t_2 = 20$  °С, имея пятикратный запас прочности? Считать прочность баллона не зависящей от температуры.

5.41. Сколько качаний надо сделать, чтобы при помощи насоса, захватывающего при каждом качании  $V = 40$  см<sup>3</sup> воздуха, наполнить пустую камеру шины велосипеда так, чтобы площадь ее соприкосновения с дорогой была равна  $S = 60$  см<sup>2</sup>? Сила давления на колесо равна  $F = 350$  Н. Объем камеры равен  $V_0 = 2000$  см<sup>3</sup>. Давление атмосферы принять равным  $p_0 = 10^5$  Па. Жесткостью покрышки камеры пренебречь.

5.42. Компрессор захватывает при каждом качании  $4$  дм<sup>3</sup> воздуха при атмосферном давлении и температуре  $-3$  °С и нагнетает его в резервуар вместимостью  $1,5$  м<sup>3</sup>, причем температура воздуха в резервуаре держится около  $45$  °С. Сколько качаний должен сделать компрессор, чтобы давление в резервуаре увеличилось на  $2 \cdot 10^5$  Па?

5.43. Форвакуумный насос (насос предварительного разрежения), подключенный к сосуду объемом  $V$ , удаляет из сосуда за время  $dt$  газ объемом  $dV = C dt$  (константу  $C$  называют скоростью откачки). Считая, что за время откачки давление газа во всех точках сосуда одинаково, и пренебрегая перепадом давления на патрубке, соединяющем сосуд с насосом, найдите закон  $p(t)$ , по которому изменяется давление газа в сосуде. Начальное давление  $p_0$ . Газ считать идеальным.

5.44. Воспользовавшись результатом предыдущей задачи, определите, сколько времени потребуется, чтобы с помощью насоса, имеющего скорость откачки  $1$  дм<sup>3</sup>/с, снизить в сосуде объемом  $10$  дм<sup>3</sup> давление от  $10^5$  до  $0,3$  Па.

## 5.2. ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИКИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

5.45. Справедливо ли распределение Максвелла для отдельной молекулы, находящейся в свободном космосе? для пылинки, взвешенной в воздухе комнаты? для броуновской частицы, плотность которой равна плотности воды?

5.46. Изобразите график функции распределения для одной из проекций скорости молекулы. Каково наиболее вероятное значение этой проекции? Каково ее среднее значение? В чем физический смысл симметричности графика относительно оси ординат?

5.47. Исследуйте, как изменяется с температурой вид графика (см. задачу 5.46). Рассмотрите предельные случаи ( $T \rightarrow 0$  и  $T \rightarrow \infty$ ).

5.48. Какова вероятность того, что конец вектора скорости молекулы газа попадает: а) внутрь кубика со сторонами  $dv_x$ ,  $dv_y$ ,  $dv_z$  в пространстве скоростей (рис. 5.4); б) внутрь шарового слоя радиусом  $v$  толщиной  $dv$ ? Какая вероятность больше?

5.49. Изобразите график функции распределения для модулей скоростей молекул. Отметьте на нем значения наиболее вероятной, средней и средней квадратичной скорости. Каков физический смысл площади под кривой? Одинаковы ли относительные числа молекул, имеющих скорость меньше и больше наиболее вероятной? Чему равна вероятность того, что какая-нибудь молекула имеет скорость, точно равную наиболее вероятной?

5.50. Исследуйте, как меняется с температурой вид графика (см. задачу 5.49). Рассмотрите предельные случаи ( $T \rightarrow 0$  и  $T \rightarrow \infty$ ).

5.51. Изобразите график функции распределения для модулей скоростей молекул, приняв за единицу скорости наиболее вероятную скорость. Как будет меняться график при изменении температуры?

5.52. Начертите в одном масштабе графики функций распределения Максвелла для молекул воздуха и для пылинок, взвешенных в воздухе (при одной и той же температуре). Чем различаются графики?

5.53. На рисунке 5.5 изображен крутильный маятник, являющийся необходимым элементом многих чувствительных измерительных приборов. Небольшое легкое зеркальце  $Z$  связано с тонкой кварцевой нитью, закрепленной в держателях  $D$ . Поворот зеркальца регистрируется с помощью луча света, отражающегося от него. Можно заметить, что чувствительный крутильный маятник никогда не находится в покое: зеркальце совершает флуктуационные колебания относительно положения равновесия. Каково происхождение этих флуктуаций? Как изменятся флуктуации, если систему поместить в вакуум? Можно ли создать такие условия, при которых флуктуации отсутствуют?

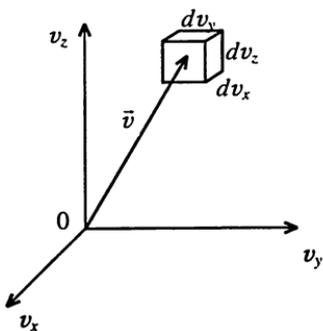


Рис. 5.4

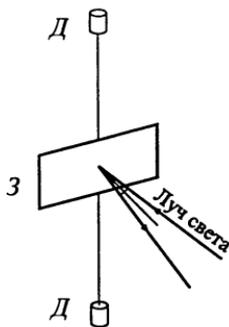


Рис. 5.5

**5.54.** Постройте графики зависимости концентрации от высоты над поверхностью Земли для азота и водорода (температура атмосферы считается постоянной). Чем различаются графики?

**5.55.** Как изменяется вид зависимостей (см. задачу 5.54) при изменении температуры? Исследуйте предельные случаи.

**5.56.** Для каких планет больше вероятность иметь атмосферу: холодных или горячих, легких или тяжелых?

**5.57.** Постройте графики зависимости концентрации броуновских частиц от высоты для случаев, когда плотность частиц больше и меньше плотности воды. Как меняются эти графики с температурой?

**5.58.** Если взвесить сосуд с газом, а затем пустой сосуд, можно найти массу газа. Но молекулы газа «летают» по всему объему сосуда, а не «лежат» на его дне. Каким же образом их масса сказывается на показаниях весов?

**5.59.** Определите объем  $V$  идеального газа при нормальных условиях, в котором средняя квадратичная флуктуация числа частиц составляет  $10^{-6}$ . Определите также среднее число частиц  $N$  в этом объеме.

**5.60.** Оцените относительную флуктуацию числа молекул при температуре 300 К: а) в единице объема газа в состоянии высокого вакуума ( $p \approx 10^{-13}$  мм рт. ст.); б) при нормальном атмосферном давлении.

**5.61.** Определите отношение числа молекул кислорода, модули скоростей которых лежат в интервале 798...802 м/с, к числу молекул, модули скоростей которых лежат в интервале 398...402 м/с. Температура кислорода 208 °С. Объясните, почему получается такое соотношение.

**5.62.** Исходя из распределения Максвелла, найдите средний квадрат проекции  $v_x$  скорости молекул газа и среднюю кинетическую энергию, приходящуюся на одну степень свободы поступательного движения молекул газа.

**5.63.** Определите температуру, при которой: а) средняя квадратичная скорость молекул водорода больше наиболее вероятной на 400 м/с;

б) функция распределения молекул кислорода по модулям скоростей будет иметь максимум при скорости 420 м/с.

5.64. Во сколько раз средняя квадратичная скорость пылинки, взвешенной в воздухе, меньше средней квадратичной скорости молекул воздуха? Масса пылинки  $10^{-8}$  г. Воздух считать однородным газом с молярной массой 0,029 кг/моль.

5.65. Найдите для газообразного азота температуру, при которой скоростям молекул 300 и 600 м/с соответствуют одинаковые значения функции распределения Максвелла. Получите формулу для определения скорости молекул газообразного азота, при которой функция распределения Максвелла для температуры  $T$  имеет такое же значение, как и для температуры, в  $n$  раз большей.

5.66. Смесь водорода и гелия находится при температуре  $T = 300$  К. При какой скорости молекул значения максвелловской функции распределения по скоростям будут одинаковыми для обоих газов?

5.67. Какую часть от общего числа молекул некоторого газа составляют молекулы, модули скоростей которых отличаются не более чем на 0,5% от наиболее вероятной скорости?

5.68. На рисунке 5.6 изображено горизонтальное сечение прибора, использованного в известном опыте Штерна по определению скорости молекул и атомов. Найдите скорость атомов серебра, испаряющихся с центральной нити  $A$  прибора, если при вращении системы из двух цилиндров с частотой  $\nu = 50$  с $^{-1}$  смещение  $DD'$  следа молекулярного пучка составило  $s = 4,8$  мм по отношению к следу пучка в неподвижном приборе. Сопоставьте результаты расчета скорости атомов серебра по приведенным данным с расчетом той же скорости по температуре газа. Температура  $T$  нити в этом опыте равнялась 1880 К,  $AD = R = 10$  см.

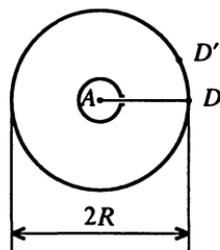


Рис. 5.6

5.69. Покажите, что доля молекул, скорости которых лежат в интервале значений от средней скорости до средней квадратичной, не меняется при изменении температуры.

5.70. При какой температуре газа число молекул со скоростями в заданном интервале  $(v, v + \Delta v)$  будет максимально? Масса каждой молекулы  $m$ .

5.71. Какая часть общего числа молекул имеет скорости: а) больше наиболее вероятной; б) меньше наиболее вероятной?

5.72. Найдите среднее число молекул, ударяющихся за 1 с о плоскую поверхность площадью 1 см $^2$ , помещенную в газе.

5.73. Чему равна наиболее вероятная энергия молекул газа при температуре  $T$ ? Равна ли она  $1/2 m v_{н.в.}^2$ , где  $v_{н.в.}$  – наиболее вероятная скорость молекулы?

Указание: Путем замены переменной  $\epsilon = mv^2/2$  перейти от функции распределения  $f(v)$  к функции  $f(\epsilon)$ .

**5.74.** Как, зная функцию распределения молекул по кинетической энергии, графически оценить долю молекул газа, кинетическая энергия которых превышает  $20 kT$ . (Именно эти молекулы с большой энергией определяют ход химических реакций.)

**5.75.** Оцените графически долю молекул гелия, энергия которых при комнатной температуре достаточна для того, чтобы при столкновении произвести ионизацию атома гелия. Энергия ионизации атома гелия равна 21 эВ.

**5.76.** Пассажирский самолет совершает полеты на высоте 8300 м. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабинах при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте 2700 м. Найдите разность давлений внутри и снаружи кабины. Среднюю температуру наружного воздуха считать равной  $0^\circ\text{C}$ , давление у поверхности Земли равно  $10^5$  Па.

**5.77.** Космические аппараты «Венера-5» и «Венера-6» разрушились в атмосфере Венеры на высоте 17 км от поверхности планеты. Оцените давление венерианской атмосферы в момент разрушения, если у поверхности Венеры оно приблизительно равно  $10^7$  Па. Температуру считать одинаковой на всех высотах и равной  $477^\circ\text{C}$ . Ускорение свободного падения на Венере  $8,85 \text{ м/с}^2$ . Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа.

**5.78.** Перрен, наблюдавший при помощи микроскопа изменение числа взвешенных частиц гуммигута с изменением высоты, применив барометрическую формулу, экспериментально определил значение постоянной Авогадро. В одном из своих опытов Перрен нашел, что при расстоянии между двумя слоями  $\Delta h = 100$  мкм число  $n$  взвешенных частиц гуммигута в одном слое вдвое больше, чем в другом. Температура гуммигута  $20^\circ\text{C}$ . Частицы гуммигута диаметром  $d = 0,3 \cdot 10^{-4}$  см были взвешены в жидкости, плотность которой на  $\Delta\rho = 0,2 \text{ г/см}^3$  меньше плотности частиц. Определите по этим данным значение постоянной Авогадро.

**5.79.** В изотермической атмосфере концентрация молекул убывает с высотой по закону  $n = n_0 \exp[-Mgh/(RT)] = n_0 \exp(-h/h_0)$ , где  $h_0 = RT/(Mg)$  – так называемая шкала высоты,  $M$  – молярная масса газа. Рассчитайте  $h_0$  для земной атмосферы при  $T = 290 \text{ К}$  и для околосолнечного пространства. Средняя молярная масса газа у поверхности Солнца  $M_0 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ , температура  $5500 \text{ К}$ , ускорение свободного падения у поверхности Солнца  $g_c = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м/с}^2$ .

**5.80.** Сосуд с газом находится в поле тяготения. Покажите, что разность сил давления газа на нижнее и верхнее основания сосуда

равна силе тяжести, действующей на газ, заключенный в сосуде. Считать, что зависимость концентрации молекул газа от высоты описывается формулой Больцмана.

**5.81.** В длинном вертикальном сосуде находится газ, состоящий из двух сортов молекул с массами  $m_1$  и  $m_2$ , причем  $m_2 > m_1$ . Концентрации этих молекул у дна сосуда равны соответственно  $n_1$  и  $n_2$ , причем  $n_2 > n_1$ . Считая, что по всей высоте поддерживается одна и та же температура  $T$  и ускорение свободного падения равно  $g$ , найдите высоту, на которой концентрации этих сортов молекул будут одинаковыми.

**5.82.** Какую массу имеет воздух, взятый в объеме  $1 \text{ м}^3$ : а) у поверхности Земли; б) на высоте 4 км от поверхности Земли? Температура воздуха  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  и не зависит от высоты. Давление у поверхности Земли  $10^5 \text{ Па}$ .

**5.83.** Определите вес цилиндрического столба воздуха, площадь основания которого равна  $S = 1 \text{ м}^2$ , а высота равна высоте Останкинской телебашни ( $h = 530 \text{ м}$ ). Считайте, что температура воздуха  $T = 300 \text{ К}$ , давление у поверхности Земли  $p_0 = 10^5 \text{ Па}$ .

**5.84.** Предполагая, что атмосферное давление убывает с высотой в соответствии с барометрической формулой Больцмана, получите формулу для высоты центра масс вертикального цилиндрического столба воздуха. Во сколько раз плотность воздуха  $\rho_H$  на этой высоте меньше плотности воздуха  $\rho_0$  у поверхности Земли?

**5.85.** Внутри вертикальной трубы высотой  $h = 100 \text{ м}$  находится воздух при температуре  $T_1 = 500 \text{ К}$ , снаружи трубы температура воздуха  $T_2 = 250 \text{ К}$ . Труба сверху открыта, а внизу отделена от наружного воздуха заслонкой площадью  $S = 300 \text{ см}^2$ . Какая сила действует на заслонку, если давление воздуха у верхнего конца трубы  $p_0 = 9,7 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ?

**5.86.** Считая, что к атмосфере Земли применима барометрическая формула Больцмана, найдите среднее значение потенциальной энергии отдельной молекулы в поле тяготения Земли. Определите долю молекул  $\alpha$ , потенциальная энергия которых меньше средней.

**5.87.** Горизонтально расположенная трубка длиной  $l = 22 \text{ см}$  вращается вокруг вертикальной оси, проходящей сквозь ее середину, с угловой скоростью  $60\pi \text{ рад/с}$ . Температура воздуха  $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Принимая давление воздуха внутри трубки вблизи ее открытых концов равным атмосферному ( $p_0 = 10^5 \text{ Па}$ ), определите давление в середине трубки.

**5.88.** Закрытую с обоих торцов горизонтальную трубку длиной  $l = 1 \text{ м}$ , заполненную диоксидом серы, перемещают вдоль ее оси с постоянным ускорением  $a$ . При каком значении ускорения концентрации газа вблизи торцов трубки будут отличаться друг от друга на  $\eta \approx 0,5\%$ , если температура газа равна комнатной?

### 5.3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

**5.89.** Как зависит внутренняя энергия идеального газа от числа степеней свободы его молекул? Чем определяется число степеней свободы?

**5.90.** При одной и той же температуре в одинаковых объемах заключено по одному моллю одноатомного и многоатомного газа. Одинаковы ли давления, оказываемые ими на стенки сосудов?

**5.91.** Сосуд с теплонепроницаемыми стенками, содержащий одноатомный идеальный газ при некоторой температуре, движется с известной скоростью, а затем внезапно останавливается. Как изменится температура газа в сосуде?

**5.92.** Как изменится ответ на предыдущий вопрос, если сосуд содержит идеальный газ той же молярной массы, но молекула его состоит из двух атомов?

**5.93.** Определите молярную теплоемкость газа в изохорном, изобарном, изотермическом и адиабатном процессах. Может ли теплоемкость идеального газа при каком-либо процессе быть отрицательной?

**5.94.** В каком из процессов (рис. 5.7) идеальный газ имеет наибольшую теплоемкость, а в каком – наименьшую?

**5.95.** Идеальный газ, количество вещества которого 1 моль, расширяется от объема  $V_1$  (давление  $p_1$ ) до объема  $V_2$  изотермически; изобарно; адиабатно. При каком процессе он совершает наибольшую работу? В каком процессе (изотермическом или изобарном) газу сообщается большее количество теплоты? Поясните ответ графически.

**5.96.** Газ сжимают от объема  $V_1$  (давление  $p_1$ ) до объема  $V_2$  изотермически; изобарно; адиабатно. При каком процессе для этого нужно затратить большую работу? Поясните ответ графически.

**5.97.** Газ находится в сосуде под поршнем. В каком случае над ним будет совершена большая работа: если быстро вдвинуть поршень, ударив по нему, или если поршень двигать медленно?

**5.98.** С какой предельной скоростью (см. задачу 5.97) можно двигать поршень, чтобы процесс оставался квазистатическим?

**5.99.** Для данного газа получите из уравнения политропы уравнения изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного процессов.

**5.100.** Какой из газов – одноатомный или многоатомный – произведет большую работу при адиабатном расширении вдвое?

**5.101.** Дан график произвольного политропического расширения газа. Как определить, нагревался или охлаждался газ? Получал или отдавал теплоту?

**5.102.** Азот массой 200 г нагревается при постоянном давлении от 20 до 100 °С. Какое количество теплоты поглощается при этом?

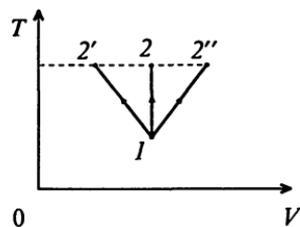


Рис. 5.7

**5.103.** Сосуд, содержащий некоторое количество азота при температуре  $t_1 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ , движется со скоростью  $v = 100\text{ м/с}$ . Какова будет температура  $t_2$  газа в сосуде, если он внезапно остановится и если передачей теплоты через стенки можно пренебречь?

**5.104.** Принимая отношение теплоемкостей для двухатомных газов равным  $c_p/c_v = \gamma = 1,4$ , вычислите удельные теплоемкости: а) кислорода; б) азота.

**5.105.** Чему равны удельные теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  некоторого двухатомного газа, если плотность этого газа при нормальных условиях равна  $1,43\text{ кг/м}^3$ ?

**5.106.** Вычислите отношение  $\gamma = c_p/c_v$  для смеси аргона ( $\nu_1 = 3$  моль) и кислорода ( $\nu_2 = 5$  моль).

**5.107.** Удельная теплоемкость при постоянном объеме  $c_v$  газовой смеси, состоящей из кислорода ( $\nu_1 = 1$  кмоль) и аргона, равна  $430\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Найдите массу аргона в смеси.

**5.108.** Чему равна степень диссоциации азота, если известно, что отношение  $c_p/c_v$  для него равно  $1,47$ ?

**5.109.** Влажный воздух содержит  $20\%$  водяного пара. Принимая сухой воздух за двухатомный газ с молярной массой  $0,029\text{ кг/моль}$ , определите: а) удельную теплоемкость влажного воздуха при постоянном объеме, б) отношение молярных теплоемкостей  $C_p/C_v$ .

**5.110.** Турбогенератор мощностью  $3\text{ МВт}$  охлаждается проточным воздухом. Какие объемы воздуха должны входить в генератор и выходить из него в течение  $1\text{ с}$ , если коэффициент полезного действия генератора равен  $94\%$ , температура воздуха, выходящего из генератора, не должна превышать  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , температура в машинном зале  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , давление воздуха  $10^5\text{ Па}$ ?

**5.111.** В комнате в течение некоторого времени был включен нагреватель. При этом температура воздуха поднялась от  $t_1$  до  $t_2$ , давление же его не изменилось и осталось равным давлению вне здания. Считая воздух идеальным газом, найдите количество теплоты  $Q$ , которое пошло на увеличение внутренней энергии воздуха, находящегося в комнате.

**5.112.** В комнате объемом  $90\text{ м}^3$  воздух сменяется полностью через  $2\text{ ч}$ . Какое количество теплоты требуется для обогрева воздуха в комнате за сутки, если температура воздуха в комнате должна быть  $18\text{ }^\circ\text{C}$ , а наружный воздух имеет температуру  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ? Принять, что средняя плотность воздуха  $1,25\text{ кг/м}^3$ .

**5.113.** В цилиндре керосинового двигателя происходит быстрое сгорание горючей смеси. Какая температура  $t_2$  и какое давление  $p_2$  получатся при сгорании, если объем камеры сгорания  $V_1 = 10\text{ дм}^3$ , давление перед сгоранием  $p_1 = 5 \cdot 10^4\text{ Па}$ , температура  $t_1 = 210\text{ }^\circ\text{C}$ ; масса керосина в смеси  $m = 0,9\text{ г}$ ; удельная теплоемкость продуктов сгорания

$c_V = 714$  Дж/(кг·К), средняя молярная масса горючей смеси  $M = 0,0294$  кг/моль, удельная теплота сгорания керосина  $q = 4,2 \cdot 10^7$  кДж/кг. Процесс сгорания считать изохорным.

**5.114.** Приняв массу атома гелия равной  $6,64 \cdot 10^{-27}$  кг, найдите удельную теплоемкость гелия при постоянном объеме.

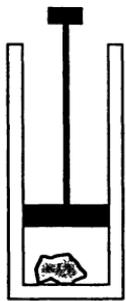


Рис. 5.8

**5.115.** Прибор (рис. 5.8) служит для демонстрации нагревания воздуха при адиабатном сжатии. Определите температуру воздуха в приборе при быстром уменьшении объема в 10 раз, если начальная температура  $15^\circ\text{C}$ .

**5.116.** Два различных газа, из которых один одноатомный, а другой – двухатомный, находятся при одинаковой температуре и занимают одинаковый объем. Газы сжимают адиабатно так, что объем их уменьшается в два раза. Какой из газов нагреется больше?

**5.117.** В сосуде под поршнем находится газ при нормальных условиях. Расстояние между дном сосуда и основанием поршня равно  $l = 25$  см. Когда на поршень положили груз массой  $m = 20$  кг, он опустился на  $h = 13,4$  см. Считая сжатие адиабатным, найдите отношение  $\gamma = c_p/c_V$  для данного газа. Площадь поперечного сечения поршня  $S = 10$  см<sup>2</sup>; массой поршня пренебречь; атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па.

**5.118.** Газ расширяется адиабатно так, что его давление уменьшается от  $p_1 = 200$  кПа до  $p_2 = 100$  кПа. Затем он нагревается при постоянном объеме до первоначальной температуры, причем его давление возрастает до  $p_3 = 122$  кПа. Определите отношение  $\gamma = c_p/c_V$  для данного газа; изобразите этот процесс графически.

**5.119.** Атомарный кислород O, молекулярный кислород O<sub>2</sub> и озон O<sub>3</sub> отдельно друг от друга расширяются изобарно, при этом расходуется некоторое количество теплоты Q. Какая доля этого количества теплоты расходуется во всех трех случаях: а) на работу расширения; б) на изменение внутренней энергии?

**5.120.** Азот некоторой массы при давлении  $10^5$  Па занимал объем 5 дм<sup>3</sup>, а при давлении  $3 \cdot 10^5$  Па – 2 дм<sup>3</sup>. Переход от первого состояния ко второму был сделан в два этапа: сначала изохорно, а затем изобарно. Определите изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты и произведенную работу. Выполните те же расчеты в случае обратного порядка этапов: сначала изобарно, затем – изохорно. Почему результаты расчетов различны?

**5.121.** Двухатомный газ ( $\gamma = 1,4$ ) некоторой массы сжимают один раз изотермически, другой раз адиабатно. Начальные температура и давление сжимаемого газа в обоих случаях одинаковы. Конечное давление в  $n$  раз больше начального. Найдите отношение работ сжатия при адиабатном и изотермическом процессах. Рассмотрите случаи: а)  $n = 2$ ; б)  $n = 100$ .

**5.122.** Один моль идеального газа изобарно нагрели на 72 К, сообщив ему количество теплоты 1,6 кДж. Найдите совершенную газом работу, приращение его внутренней энергии и отношение теплоемкостей  $C_p/C_v$ .

**5.123.** Идеальный газ ( $\nu = 2$  моль) при температуре  $T_0 = 300$  К охладили изохорно, вследствие чего его давление уменьшилось в  $n = 2,0$  раза. Затем газ изобарно расширили так, что в конечном состоянии его температура оказалась равной первоначальной. Найдите количество теплоты, сообщенное газу в данном процессе.

**5.124.** Идеальный газ ( $\nu = 3$  моль), находящийся при температуре  $T_0 = 273$  К, изотермически расширили в  $n = 5,0$  раз и затем изохорно нагрели так, что в конечном состоянии его давление стало равным первоначальному. В течение всего процесса газу сообщили количество теплоты  $Q = 80$  кДж. Найдите для этого газа отношение теплоемкостей  $\gamma = c_p/c_v$ .

**5.125.** В цилиндре под поршнем находится воздух. Какую работу нужно совершить, чтобы поднять поршень на высоту  $h_1 = 10$  см, если начальная высота столба воздуха равна  $h_0 = 15$  см и если наружное давление равно  $p_0 = 760$  мм рт. ст.? Площадь поршня  $S = 10$  см<sup>2</sup>. Весом поршня можно пренебречь. Температура во время подъема поршня остается неизменной.

**5.126.** Азот, находящийся в цилиндре под поршнем, бесконечно медленно переводят из состояния с параметрами  $p_1$  и  $V_1$  в состояние с параметрами  $p_2 = 4 p_1$ ,  $V_2 = V_1/3$ . Графиком, выражающим зависимость давления газа от объема в этом процессе, является прямая линия. Определите: а) изменение внутренней энергии газа; б) работу, совершаемую над газом. Выделяется или поглощается в этом процессе теплота?

**5.127.** Двухатомный идеальный газ расширяется от 20 до 50 дм<sup>3</sup> так, что зависимость давления от объема линейная. Начальное давление  $10^5$  Па, конечное  $2 \cdot 10^5$  Па. Является ли этот процесс политропическим? Какое количество теплоты поглощает газ при расширении?

**5.128.** Найдите молярную теплоемкость идеального газа при политропическом процессе  $pV^n = \text{const}$ , если показатель адиабаты газа равен  $\gamma$ . При каких значениях показателя политропы теплоемкость газа будет отрицательной? Постройте график зависимости  $C(n)$ .

**5.129.** При некотором политропическом процессе объем аргона был увеличен в  $\alpha = 4,0$  раза. Давление при этом уменьшилось в  $\beta = 8,0$  раз. Найдите показатель политропы и молярную теплоемкость аргона в этом процессе, считая газ идеальным.

**5.130.** При политропическом расширении идеального одноатомного газа ( $\nu = 1$  моль) его температура уменьшается на 1 К. Показатель политропы  $n = 1,5$ . Определите: а) молярную теплоемкость газа в этом процессе; б) количество теплоты, отданной или полученной газом; в) работу, совершаемую газом.

## 5.4. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

**5.131.** Определите изменение энтропии в обратимом политропическом процессе. Рассмотрите частные случаи изохорного, изобарного и изотермического процессов.

**5.132.** Идеальный газ нагревается от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  один раз изохорно, а другой – изобарно. В каком случае произошло большее изменение энтропии?

**5.133.** Одноатомный газ ( $\nu_1 = 1$  моль) и двухатомный газ ( $\nu_2 = 1$  моль) изохорно нагрели от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ . У какого газа произошло большее изменение энтропии?

**5.134.** Определите изменение энтропии при обратимом адиабатном процессе расширения (сжатия). Поясните физический смысл результата.

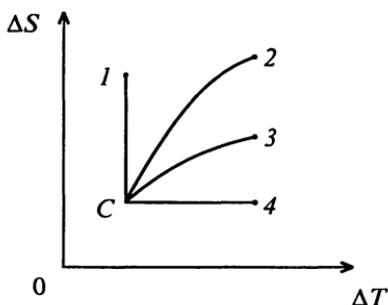


Рис. 5.9

**5.135.** Из начального состояния  $C$  (рис. 5.9) газ переходит в состояния 1, 2, 3, 4 в различных изопроцессах. Какой график какому процессу соответствует?

**5.136.** Можно ли изменить энтропию идеального газа, не сообщая ему теплоты?

**5.137.** Система перешла из состояния 1 в состояние 2 необратимым путем. Можно ли определить изменение энтропии в этом процессе?

**5.138.** Сосуд с теплонепроницаемыми стенками разделен перегородкой на две равные части, в одной из которых создан высокий вакуум., а в другой находится идеальный газ ( $\nu = 1$  моль). Перегородку быстро удаляют, и через некоторое время в сосуде устанавливается равновесие. Определите изменение энтропии в этом процессе.

**5.139.** На графике в координатах  $p, V$  изображен произвольный политропный процесс. Как определить знак приращения энтропии газа в этом процессе?

**5.140.** На графике в координатах  $T, S$  изображен произвольный политропный процесс. Как определить по графику количество теплоты, отданной или полученной системой?

**5.141.** Почему рабочее тело в тепловой машине должно совершать циклический процесс? Каковы роли нагревателя и холодильника?

**5.142.** Получите выражение для максимального значения КПД тепловой машины, используя свойства энтропии как функции состояния.

**5.143.** Изобразите цикл Карно в координатах  $S, T$ . Определите с помощью графика КПД цикла.

**5.144.** Возможен ли процесс, при котором вся теплота, заимствованная от некоторого резервуара с постоянной температурой, идет на совершение работы?

**5.145.** Как изменится температура воздуха в комнате, если бытовой холодильник будет работать с открытой дверцей?

**5.146.** Покажите, что энтропия увеличивается, если горячая вода отдает теплоту холодной воде такой же массы и температуры их уравниваются.

**5.147.** Два сосуда, вместимости которых  $V_1 = 1,6$  л и  $V_2 = 3,4$  л, содержат соответственно оксид углерода массой  $m_1 = 14$  г и кислород массой  $m_2 = 16$  г. Температуры газов одинаковы. Сосуды соединяют, газы перемешиваются. Определите приращение энтропии в этом процессе.

**5.148.** Считая, что вероятность того, что  $N$  молекул газа, каждая из которых с равной вероятностью может находиться в любой элементарной ячейке объемом  $V_1$ , в определенный момент времени одновременно попадают в часть  $V_2$  этого объема, равна  $W = (V_2/V_1)^N$ , покажите, что изменение энтропии при изотермическом расширении идеального газа от  $V_2$  до  $V_1$  равно  $\Delta S = k \ln W$ , где  $k$  – постоянная Больцмана.

**5.149.** При нагревании двухатомного газа ( $\nu = 1$  кмоль) его абсолютная температура увеличивается в 1,5 раза. Найдите изменение энтропии, если нагревание происходит: а) изохорно; б) изобарно.

**5.150.** Идеальный газ ( $\nu = 2$  моль) сначала изохорно охладил, а затем изобарно расширил так, что температура газа стала равна первоначальной. Найдите изменение энтропии газа, если его давление в данном процессе уменьшилось в  $n = 3,3$  раза.

**5.151.** Определите изменение энтропии водорода массой  $m = 1$  г, если: а) газ сначала адиабатно сжимают до вдвое меньшего объема, затем изохорно охлаждают до начальной температуры; б) газ сначала адиабатно сжимают до вдвое меньшего объема, затем изотермически расширяют до начального объема.

**5.152.** Найдите изменение энтропии идеального газа ( $\nu = 2$  моль) с показателем адиабаты  $\gamma = 1,30$ , если в результате некоторого процесса объем газа увеличился в  $\alpha = 2,0$  раза, а давление уменьшилось в  $\beta = 3,0$  раза.

**5.153.** Идеальный газ ( $\nu = 1$  моль) с показателем адиабаты  $\gamma$  совершает политропический процесс, в результате которого абсолютная температура увеличивается в  $\tau$  раз. Показатель политропы  $n$ . Найдите изменение энтропии газа в данном процессе.

**5.154.** Процесс расширения аргона ( $\nu = 2$  моль) происходит так, что давление газа увеличивается прямо пропорционально объему. Найдите изменение энтропии газа при увеличении его объема в  $\alpha = 2,0$  раза.

**5.155.** В политропном процессе энтропия азота массой 1 кг увеличилась на 140 Дж/К, при этом температура газа изменилась от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 120^\circ\text{C}$ . Определите показатель политропы.

5.156. При политропном расширении воздуха к нему было подведено количество теплоты  $Q = 90$  кДж, однако температура воздуха снизилась с  $t_1 = 25$  °С до  $t_2 = -37$  °С. Определите изменение энтропии в этом процессе.

5.157. Изменение энтропии в процессе, характеризуемом участком между двумя адиабатами в цикле Карно, равно 4,2 кДж/К. Разность температур, соответствующих двум изотермам, равна 100 °С. Какое количество теплоты идет на совершение работы в этом цикле?

5.158. Докажите, что цикл из двух изохор при объемах  $V_1$  и  $V_2$  и двух изотерм при температурах  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 5.10) имеет КПД, меньший КПД цикла Карно.

5.159. Цикл Карно осуществляется в интервале температур  $T_1 = 600$  К и  $T_2 = 200$  К. Давление в конце изотермического расширения и в начале адиабатного сжатия одинаково. Рабочим телом является воздух. Определите полезную работу, совершаемую воздухом ( $m = 1$  кг) за цикл.

5.160. В каком случае КПД цикла Карно повысится больше: при увеличении температуры нагревателя на  $\Delta T$  или при уменьшении температуры холодильника на такую же величину?

5.161. Водород совершает цикл Карно. Найдите КПД цикла, если при адиабатном расширении: а) объем газа увеличивается в  $n = 2,0$  раза; б) давление уменьшается в  $n = 2,0$  раза.

5.162. Идеальный газ ( $\nu = 1$  кмоль) совершает циклический процесс, изображаемый двумя изохорами и двумя изобарами. При этом объем газа изменяется от  $V_1 = 25$  м<sup>3</sup> до  $V_2 = 50$  м<sup>3</sup>, а давление изменяется от  $p_1 = 100$  кПа до  $p_2 = 200$  кПа. Во сколько раз работа, совершаемая при таком цикле, меньше работы, совершаемой в цикле Карно, изотермы которого соответствуют наибольшей и наименьшей температурам рассматриваемого цикла, если при изотермическом расширении объем увеличился в два раза?

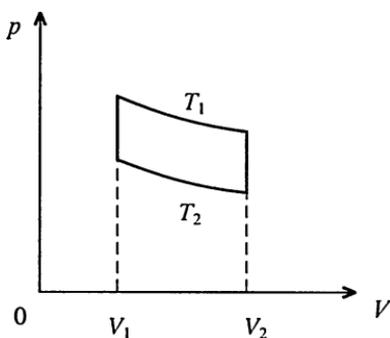


Рис. 5.10

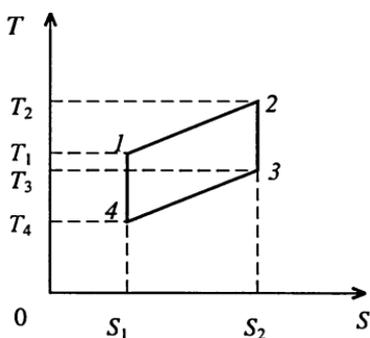


Рис. 5.11

5.163. Обратимый цикл, совершаемый некоторой термодинамической системой, имеет на диаграмме  $T, S$  вид, показанный на рисунке 5.11. Найдите КПД цикла.

5.164. Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, передает некоторое количество теплоты от холодильника с водой при температуре  $0\text{ }^\circ\text{C}$  кипятильнику с водой при температуре  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Сколько воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар  $1\text{ кг}$  воды в кипятильнике?

5.165. Каково максимальное количество теплоты, которое может быть отнято у холодильной камеры при помощи холодильной машины при совершении работы  $A = 1\text{ кДж}$ , если температура в холодильной камере  $t_2 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура окружающей среды (воздух в комнате)  $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ?

5.166. Определите температуру  $T$  в камере холодильника, если количество отведенной теплоты в  $\epsilon = 5$  раз превышает затраченную энергию. Холодильник работает по циклу Карно. Температура воздуха в комнате  $T_0 = 293\text{ К}$ .

## 5.5. ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА

5.167. При каких условиях возникают процессы переноса? Каков их молекулярный механизм?

5.168. Чем различаются условия протекания стационарных и нестационарных процессов переноса? Каков конечный результат протекания процессов переноса в изолированной системе?

5.169. Как меняется энтропия изолированной системы при протекании в ней процессов переноса?

5.170. От чего зависит скорость протекания процессов переноса?

5.171. Теплопроводность газа, как известно, не зависит от давления. Зачем же выкачивают воздух из пространства между двойными стенками сосуда Дьюара?

5.172. Определите молярную теплоемкость процесса, совершаемого идеальным газом, при котором число столкновений между молекулами в единице объема газа в единицу времени остается неизменным.

5.173. Когда больше длина свободного пробега молекулы атмосферного воздуха: летом или зимой? Атмосферное давление считать постоянным.

5.174. Газ адиабатно расширился вдвое. Какая из величин изменилась сильнее в этом процессе: коэффициент диффузии или теплопроводность?

5.175. Как меняются число столкновений и длина свободного пробега молекул при нагревании газа в закрытом сосуде? При изотермическом сжатии?

5.176. Определите характер зависимости средней длины свободного пробега  $\lambda$  и среднего времени свободного пробега  $\tau$  молекул газа от его температуры  $T$  и давления  $p$ . Изобразите зависимости  $\lambda$  и  $\tau$  от  $T$  при  $p = \text{const}$ . Как они изменятся при увеличении (уменьшении)  $p$ ?

5.177. Сравните зависимости от температуры вязкости и коэффициента диффузии: а) в изохорном процессе; б) в изобарном процессе.

5.178. Почему вязкость и теплопроводность не зависят от давления, а коэффициент диффузии зависит?

5.179. Адиабатно сжали вдвое сначала одноатомный, а затем двухатомный газ. Одинаково ли изменились их вязкости?

5.180. Должно ли зависеть сечение рассеяния от температуры в рамках модели идеального газа? Чем объясняется экспериментально наблюдаемая зависимость?

5.181. Находится ли межзвездный газ, концентрация частиц которого равна  $1 \text{ см}^{-3}$  в состоянии высокого вакуума?

5.182. Определите плотность водорода, если средняя длина свободного пробега молекул  $\lambda = 1 \text{ см}$ , и отношение найденной плотности к плотности водорода при нормальных условиях.

5.183. Вычислите, какая часть молекул газа: а) пролетает без столкновений расстояния, превышающие среднюю длину свободного пробега  $\lambda$ ; б) имеет длину свободного пробега в интервале от  $\lambda$  до  $2\lambda$ .

5.184. Во сколько раз средняя длина свободного пробега молекул азота, находящегося при нормальных условиях, больше среднего расстояния между его молекулами?

5.185. Определите число всех столкновений, которые произойдут за  $1 \text{ с}$  в  $1 \text{ см}^3$  азота при нормальных условиях.

5.186. Определите минимальное давление, при котором теплопроводность воздуха, заключенного между двойными стенками сосуда, еще не зависит от давления. Расстояние между стенками  $d = 5 \text{ мм}$ , температура газа  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5.187. Идеальный газ совершил процесс, в результате которого его давление возросло в  $\eta$  раз. Как и во сколько раз изменились средняя длина свободного пробега  $\lambda$  и среднее число столкновений молекулы в единицу времени  $z$ , если процесс: а) изохорный, б) изотермический?

5.188. Средняя длина свободного пробега в азоте равна при нормальных условиях  $6 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ . Азот некоторой массы перешел от нормальных условий к состоянию, при котором его температура равна  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какова длина свободного пробега в новом состоянии азота, если процесс перехода был адиабатным?

5.189. Как зависят средняя длина свободного пробега  $\lambda$  и число столкновений молекулы в единицу времени  $z$  от абсолютной температуры идеального газа, если процесс, который совершает газ, является: а) изохорным; б) изобарным?

**5.190.** Коэффициент диффузии и вязкость кислорода равны соответственно  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $1,95 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Найдите при этих условиях: а) плотность кислорода; б) длину свободного пробега; в) среднюю скорость молекул.

**5.191.** Найдите теплопроводность водорода, если вязкость для него при этих условиях равна  $8,6 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

**5.192.** Углекислый газ и азот находятся при одинаковых температурах и давлениях. Найдите для этих газов отношение: а) коэффициентов диффузии; б) вязкостей; в) теплопроводностей. Диаметры молекул газов считать одинаковыми.

**5.193.** В результате некоторого процесса вязкость идеального газа увеличилась в  $\alpha = 2,0$  раза, а коэффициент диффузии – в  $\beta = 4,0$  раза. Как и во сколько раз изменилось давление газа?

**5.194.** Как изменятся коэффициент диффузии  $D$  и вязкость  $\eta$  идеального газа, если объем газа увеличить в  $n$  раз: а) изотермически; б) изобарно?

**5.195.** Как изменится вязкость двухатомного газа, состояние которого далеко от вакуума, при уменьшении объема в  $n = 2$  раза, если процесс перехода был: а) изотермическим; б) изобарным; в) адиабатным?

**5.196.** Найдите показатель политропы  $n$  процесса, совершаемого идеальным газом, при котором остается неизменным: а) коэффициент диффузии; б) вязкость; в) теплопроводность.

**5.197.** Самолет летит со скоростью  $v = 360 \text{ км/ч}$ . Считая, что толщина слоя воздуха у крыла самолета, увлекаемого вследствие вязкости, равна  $h = 4 \text{ см}$ , найдите касательную силу, действующую на поверхность крыла площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ . Диаметр молекулы воздуха принять равным  $d = 0,3 \text{ нм}$ . Температура воздуха  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**5.198.** Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами заполнено газом. Радиусы цилиндров равны соответственно  $r = 5 \text{ см}$  и  $R = 5,2 \text{ см}$ . Высота внутреннего цилиндра  $h = 25 \text{ см}$ . Внешний цилиндр вращается с частотой  $n = 360 \text{ мин}^{-1}$ . Для того, чтобы внутренний цилиндр оставался неподвижным, к нему надо приложить касательную силу  $F = 1,38 \text{ мН}$ . Чему равна вязкость газа, находящегося между цилиндрами?

**5.199.** Вязкость кислорода при некоторой температуре равна  $0,05 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Определите его теплопроводность при этой температуре.

**5.200.** Какое количество теплоты теряется ежечасно через окно за счет теплопроводности воздуха, заключенного между рамами? Площадь каждой рамы  $S = 3 \text{ м}^2$ , расстояние между рамами  $d = 30 \text{ см}$ . Температура помещения  $t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура наружного пространства  $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопроводность воздуха  $\kappa = 0,023 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

**5.201.** Пространство между двумя большими параллельными пластинами, расположенными на расстоянии  $l = 5 \text{ см}$  друг от друга, за-

полнено гелием при нормальном атмосферном давлении. Одна пластина поддерживается при температуре  $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , другая – при температуре  $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ . Найдите поверхностную плотность теплового потока  $\varphi$ . Эффективный диаметр молекулы гелия принять равным  $d = 0,2\text{ нм}$ .

**5.202.** Зазор между двумя концентрическими сферами заполнен однородным изотропным веществом. Радиусы сфер соответственно равны  $r_1 = 10,0\text{ см}$  и  $r_2 = 12,0\text{ см}$ . Поверхность внутренней сферы поддерживается при температуре  $T_1 = 320\text{ К}$ , поверхность внешней сферы – при температуре  $T_2 = 300\text{ К}$ . В этих условиях от внутренней сферы к внешней течет установившийся тепловой поток  $\Phi = 2,0\text{ кВт}$ . Считая теплопроводность  $\kappa$  вещества в зазоре не зависящей от температуры, определите: а) значение теплопроводности  $\kappa$ ; б) температуру  $T$  в зазоре как функцию расстояния  $r$  от центра сфер.

**5.203.** Найдите распределение температур в пространстве между двумя коаксиальными цилиндрами радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , заполненном однородным теплопроводящим веществом, если температуры цилиндров постоянны и равны соответственно  $T_1$  и  $T_2$ .

## 5.6. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ЖИДКОСТИ. УРАВНЕНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

**5.204.** Начертите график зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними. Какая аппроксимация применяется в теории Ван-дер-Ваальса?

**5.205.** В уравнении Ван-дер-Ваальса учтите по отдельности сначала поправку  $b$ , а затем поправку  $a$ . Постройте соответствующее семейство изотерм. Имеют ли физический смысл участки, где давление отрицательно?

**5.206.** Постройте семейство изотерм Ван-дер-Ваальса в координатах  $pV$ , сравните с соответствующим семейством для идеального газа. Какие участки изотерм Ван-дер-Ваальса описывают физически неосуществимые состояния?

**5.207.** Большую или меньшую работу при изотермическом расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$  совершает реальный газ, чем идеальный?

**5.208.** Можно ли при помощи манометра измерить внутреннее давление в реальном газе или жидкости?

**5.209.** Как различаются теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении для идеального и реального газа?

**5.210.** Реальный газ адиабатно расширился в вакуум. Как при этом изменились его внутренняя энергия и температура?

**5.211.** В цилиндре с поршнем, помещенном в термостат, находится реальный газ. Как экспериментально определить, больше или меньше критической его температура?

**5.212.** Можно ли путем сжатия при постоянной температуре  $T = 273$  К перевести в жидкое состояние: а) углекислый газ; б) водород; в) кислород?

**5.213.** Как связано значение критической температуры с глубиной минимума на кривой зависимости потенциальной энергии от расстояния для данного сорта молекул?

**5.214.** Почему инертный газ имеет более низкую критическую температуру по сравнению с другим (неинертным) газом с близким значением молярной массы? Как должна изменяться (увеличиваться или уменьшаться) критическая температура инертного газа при увеличении молярной массы?

**5.215.** Как соотносятся сжимаемости жидкости и газа? В чем причина малой сжимаемости жидкости?

**5.216.** Поведение какого газа: водорода или гелия можно описать в рамках модели идеального газа в более широкой области температур?

**5.217.** Как меняются удельные объемы газа и жидкости при изменении давления в изотермическом процессе в области сосуществования двух фаз?

**5.218.** Пусть известна суммарная масса жидкости и ее насыщенного пара в объеме  $V$  при температуре  $T$ . Как приближенно определить массу жидкости и массу пара, воспользовавшись экспериментальной изотермой Ван-дер-Ваальса при этой температуре?

**5.219.** Аргон, количество вещества которого 1 моль, имеет при температуре 300 К объем  $1 \text{ дм}^3$ . Вычислите давление аргона: а) считая, что он обладает свойствами идеального газа; б) принимая во внимание поправку Ван-дер-Ваальса на давление, но пренебрегая поправкой на объем, в) принимая во внимание поправку на объем, но пренебрегая поправкой на давление; г) принимая во внимание обе поправки Ван-дер-Ваальса.

**5.220.** В баллоне вместимостью 20 л находится некоторый газ ( $\nu = 80$  моль). При температуре  $14^\circ\text{C}$  давление газа равно  $9 \cdot 10^6$  Па; при температуре  $63^\circ\text{C}$  –  $1,09 \cdot 10^7$  Па. Вычислите постоянные Ван-дер-Ваальса для этого газа.

**5.221.** Для водорода силы взаимодействия между молекулами незначительны: преимущественную роль играют собственные размеры молекул. Напишите уравнение состояния такого полуйдеального газа. Найдите, какая ошибка будет допущена при определении количества вещества водорода, находящегося в некотором объеме при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 2,8 \cdot 10^6$  Па, если не учитывать собственные размеры молекул.

**5.222.** Рассмотрите, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, изотермические процессы в газах такой плотности, что условие  $V_m \gg b$  ( $V_m$  – молярный объем) является выполненным. При какой температуре

изотермические процессы в газе протекают так же, как и в идеальном газе? Найдите эти температуры для углекислого газа и водорода.

**5.223.** Газ расширяется при постоянной температуре  $t = 27^\circ\text{C}$ , причем молярный объем газа увеличивается от  $V_{m1} = 5 \text{ дм}^3/\text{моль}$  до  $V_{m2} = 15 \text{ дм}^3/\text{моль}$ . Определите, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, работу при расширении газа ( $\nu = 1 \text{ моль}$ ). Сделайте расчеты: а) для азота; б) для водорода.

**5.224.** Какое количество теплоты надо сообщить углекислому газу ( $\nu = 3 \text{ моль}$ ), чтобы при расширении в вакуум от объема  $V_1 = 5,0 \text{ л}$  до объема  $V_2 = 10,7 \text{ л}$  температура его не изменилась?

**5.225.** Некоторый газ ( $\nu = 0,5 \text{ кмоль}$ ) занимает объем  $V_1 = 1 \text{ м}^3$ . При расширении газа до объема  $V_2 = 1,2 \text{ м}^3$  была совершена работа против сил взаимодействия молекул, равная  $A = 5800 \text{ Дж}$ . Найдите для этого газа постоянную  $a$ , входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.

**5.226.** Кислород ( $\nu = 1 \text{ моль}$ ), занимавший первоначально объем  $V_1 = 1,00 \text{ дм}^3$  при температуре  $t = -100^\circ\text{C}$ , расширился изотермически до объема  $V_2 = 10 \text{ дм}^3$ . Найдите: а) приращение внутренней энергии газа  $\Delta U$ ; б) работу  $A$ , совершенную газом (сравните  $A$  с работой, вычисленной по формуле для идеальной газ); в) количество теплоты  $Q$ , полученной газом.

**5.227.** Найдите изменение энтропии ван-дер-ваальсовского газа ( $\nu = 1 \text{ моль}$ ) при переходе из состояния с параметрами  $T_1$  и  $V_1$  в состояние с параметрами  $T_2$  и  $V_2$ .

**5.228.** При изотермическом расширении кислорода массой  $10 \text{ г}$  объем газа увеличивается от  $1$  до  $5 \text{ дм}^3$ . Считая газ подчиняющимся уравнению Ван-дер-Ваальса, определите изменение энтропии.

**5.229.** Какую часть сосуда должен занимать жидкий эфир при комнатной температуре, чтобы при достижении критической температуры он оказался в критическом состоянии? Для эфира критические значения температуры и давления соответственно равны  $467 \text{ К}$  и  $3,6 \text{ МПа}$ . Молярная масса эфира равна  $0,074 \text{ кг/моль}$ .

**5.230.** Вычислите температуру и плотность углекислого газа в критическом состоянии, считая газ ван-дер-ваальсовским.

**5.231.** Найдите среднюю длину свободного пробега молекул углекислого газа при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекулы вычислите, считая известными для углекислого газа критические температуру  $T_k$  и давление  $p_k$ .

**5.232.** Найдите постоянные  $a$  и  $b$  уравнения Ван-дер-Ваальса для углекислого газа по его критическим давлению и температуре ( $p_k = 7,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $t_k = 31,1^\circ\text{C}$ ).

**5.233.** Кислород ( $\nu = 1 \text{ моль}$ ) занимает объем  $V = 0,056 \text{ м}^3$  при давлении  $p = 9 \cdot 10^7 \text{ Па}$ . Найдите температуру газа, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса в приведенных величинах.

5.234. Во сколько раз давление газа больше его критического значения, если известно, что объем и температура газа вдвое больше критических значений этих величин?

## 5.7 ПОВЕРХНОСТНЫЕ И КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ

5.235. Почему капли разлитой ртути при соприкосновении сливаются?

5.236. Как зависит поверхностное натяжение от температуры?

5.237. При разрезании стеклянных трубок получают острые края. Как их можно сгладить?

5.238. Почему для более быстрого высыхания сено взрыхляют, а почву уплотняют?

5.239. Какую форму в состоянии невесомости примет жидкость, наполовину заполняющая бутылку? Зачем перед покраской поверхность «грунтуют», т. е. смазывают олифой?

5.240. Почему вода, вылитая на раскаленную плиту, распадается на отдельные шарики?

5.241. Почему струйка воды, вытекающая из водопроводного крана, постепенно делается тоньше и распадается на капли?

5.242. В горизонтально расположенной капиллярной трубке, открытой с обоих концов, находится короткий столбик смачивающей (несмачивающей) жидкости. Как он будет себя вести при нагревании одного из концов трубки?

5.243. Если концы S-образной картонной пластинки натереть мылом и положить на поверхность воды, то пластинка начинает вращаться. Почему?

5.244. Стеклянная капиллярная трубка, диаметр внутреннего канала которой  $d = 0,2$  мм, а длина  $h_0 = 20$  см, опускается в вертикальном положении в воду. Верхний конец трубки запаян. Какую длину  $l$  должна иметь часть трубки, находящаяся под водой, чтобы уровень воды в капилляре и вне его был одинаков? Давление атмосферного воздуха  $p_0 = 10^5$  Па.

5.245. U-образный сосуд состоит из сообщающихся широкой и узкой трубок. При наливании в сосуд воды между ее уровнями в узкой и широкой трубках устанавливается разность высот  $h = 8$  см (рис. 5.12). Внутренний радиус широкой трубки  $r_1 = 5$  мм. Считая смачивание полным, найдите радиус  $r_2$  узкой трубки.

5.246. Стеклянный стержень диаметром  $d_1 = 1,5$  мм вставили в стеклянный капилляр с диаметром внут-

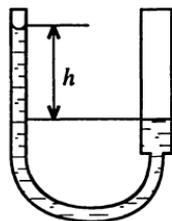


Рис. 5.12

ренного канала  $d_2 = 2$  мм так, что их оси совпадают. Затем всю систему установили вертикально и привели в соприкосновение с поверхностью воды. На какую высоту поднимется вода в таком капилляре?

5.247. Внутренний диаметр барометрической трубки равен 0,75 см. Какую поправку надо внести, измеряя атмосферное давление по высоте ртутного столба? Несмачивание считать полным.

5.248. На поверхность воды положили смазанную жиром (полностью несмачиваемую водой) стальную иголку. Каков наибольший диаметр иголки, при котором она еще может держаться на воде?

5.249. Две вертикальные параллельные друг другу стеклянные пластины погружены частично в воду. Зазор между пластинами  $a = 0,5$  мм, размер пластин по горизонтали  $l = 10,0$  см. Считая смачивание полным, определите: а) высоту  $h$ , на которую поднимается вода в зазоре; б) модуль силы  $\vec{F}$ , с которой пластины притягиваются друг к другу.

5.250. После покрытия слоем парафина радиус отверстия решета стал равен 1,5 мм. Приняв во внимание, что вода не смачивает парафин, определите высоту слоя воды, который можно носить в решете, так чтобы вода не пролилась через отверстие.

5.251. На какой глубине  $h$  образуются пузырьки газа в воде, если при всплытии пузырьков их радиус увеличивается в  $\eta = 1,1$  раза, достигая на поверхности значения  $r = 1$  мкм. Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па. Предполагается, что температура газа в пузырьке во время всплытия не изменяется.

5.252. В сосуде с воздухом при давлении  $p_0$  находится мыльный пузырек диаметром  $d$ . Давление воздуха изотермически уменьшили в  $n$  раз, в результате чего диаметр пузырька увеличился в  $\eta$  раз. Найдите поверхностное натяжение мыльной воды.

5.253. Поверхностное натяжение на границе вода – масло можно принять равным  $\sigma = 1,8 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>. Какую работу надо произвести, чтобы каплю масла массой  $m = 1$  г раздробить внутри воды на капельки диаметром  $d = 2 \cdot 10^{-4}$  см, если процесс дробления происходит изотермически? Плотность масла  $\rho = 0,9$  г/см<sup>3</sup>.

5.254. На сколько нагреется капля ртути, полученная от слияния двух капель радиусом 1 мм каждая?

## 5.8. РАВНОВЕСИЕ ФАЗ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

5.255. Изобразите кривую фазового равновесия жидкость – насыщенный пар в координатах  $p$ ,  $T$ . Что произойдет с системой, если около некоторой точки, лежащей на кривой, повысить (понижить) температуру при постоянном давлении? Что произойдет, если повысить (понижить) давление при постоянной температуре?

5.256. Чем определяется наклон кривой фазового равновесия?

5.257. Находится ли в состоянии равновесия со своим паром вода в стакане?

5.258. Каким образом можно экспериментально исследовать (снять по точкам) кривую равновесия фаз? Опишите схему установки.

5.259. Как зависит температура кипения от атмосферного давления?

5.260. Изобразите кривую равновесия фаз для жидкого, твердого и газообразного состояния вещества. Каковы особенности диаграммы состояния воды?

5.261. Как зависит температура плавления от давления? Каковы особенности этой зависимости для воды?

5.262. Для изменения температуры кипения воды на  $1^\circ\text{C}$  достаточно изменить давление на 27 мм рт. ст. Меньшее или большее изменение давления понадобится для такого же изменения температуры плавления льда?

5.263. Большой сосуд с кипяченой водой, в котором плавает стакан с сырой водой, ставят на нагреватель. Через некоторое время вода в стакане закипает, хотя в сосуде еще не кипит. Объясните явление.

5.264. Через несколько десятков лет после изготовления стекло может стать мутным. Почему?

5.265. Как меняется энтропия системы в процессах фазовых переходов первого рода?

5.266. Чем определяется значение скрытой теплоты испарения для данного вещества?

5.267. Как зависит скрытая теплота испарения от температуры?

5.268. В замкнутом пространстве помещены один выше другого два открытых сосуда с одной и той же жидкостью (рис 5.13). Если температуры жидкостей в начальный момент одинаковы, то вследствие испарения жидкости в верхнем сосуде и конденсации паров в нижнем сосуде жидкость в нижнем сосуде будет нагреваться, а в верхнем охлаждаться. Противоречит ли это второму закону термодинамики?

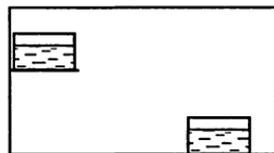


Рис. 5.13

5.269. В нижнем из сосудов (см. задачу 5.268) находится вода при температуре  $17,2^\circ\text{C}$ . Определите разность температур между верхним и нижним сосудами, если разность уровней воды в сосудах  $h = 3$  м. Теплообменом между сосудами пренебречь.

5.270. Найдите изменение температуры плавления льда вблизи  $0^\circ\text{C}$  при повышении давления на  $\Delta p = 101325$  Па, если удельный объем льда на  $\Delta V = 0,091$  см<sup>3</sup>/г больше удельного объема воды.

5.271. Лед, находившийся при нормальных условиях, подвергли сжатию до давления  $p = 6,48 \cdot 10^7$  Па. Считая, что понижение темпера-

туры плавления льда в данных условиях линейно зависит от давления, найдите, какая часть льда растаяла. Удельный объем воды на  $\Delta V = 0,091 \text{ см}^3/\text{г}$  меньше удельного объема льда.

5.272. Найдите давление насыщенного пара как функцию температуры  $p(T)$ , если при температуре  $T_0$  его давление  $p_0$ . Считать, что удельная теплота испарения не зависит от температуры  $T$ , удельный объем жидкости пренебрежимо мал по сравнению с удельным объемом пара, насыщенный пар подчиняется уравнению состояния идеального газа. Выясните, при каких условиях эти упрощения допустимы.

5.273. В замкнутом прочном металлическом сосуде вместимостью  $1 \text{ дм}^3$  находятся вода и пар; их общая масса равна  $1 \text{ г}$ . Сколько в сосуде пара и сколько воды, если температура равна  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ? При какой температуре сосуд будет наполнен одним насыщенным паром?

5.274. Относительная влажность воздуха, находящегося в сосуде при температуре  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , равна  $70\%$ . Какой станет относительная влажность, если температуру повысить до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  и объем при этом уменьшить в два раза?

5.275. Температура в комнате  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $50\%$ . В металлический чайник налили холодную воду. Какова температура воды, при которой чайник перестает запотевать?

5.276. Вещество некоторой массы, взятое в состоянии насыщенного пара, изотермически сжали в  $n$  раз по объему. Найдите, какую часть  $\eta$  конечного объема занимает жидкая фаза, если удельные объемы насыщенного пара и жидкой фазы отличаются друг от друга в  $N$  раз ( $N > n$ ). Ответьте на тот же вопрос, но при условии, что конечный объем вещества соответствует середине горизонтального участка изотермы на диаграмме  $p, V$ .

5.277. В камере Вильсона объемом  $V_0 = 1 \text{ дм}^3$  заключен воздух, насыщенный парами воды. Начальная температура камеры  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . При движении поршня объем камеры увеличился в  $1,25$  раза. Расширение считать адиабатным, причем  $\gamma = c_p/c_v$  принять равным  $1,4$ . Найдите: а) давление водяных паров до расширения; б) массу водяных паров в камере до расширения; в) плотность водяных паров до расширения; г) температуру пара после расширения (изменением температуры из-за выделения теплоты при конденсации пара пренебречь); д) массу сконденсированного водяного пара.

5.278. Насыщенный водяной пар находится при температуре  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  в цилиндрическом сосуде под невесомым поршнем. При медленном вдвигании поршня небольшая часть пара массой  $\Delta m = 0,70 \text{ г}$  сконденсировалась. Какая работа была совершена над паром? Пар считать идеальным газом, объемом жидкости пренебречь.

5.279. Какая часть удельной теплоты испарения воды при  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  идет на увеличение внутренней энергии системы?

**5.280.** Удельная теплота испарения бензола ( $C_6H_6$ ) при температуре  $t = 77^\circ C$  равна  $r = 398$  кдж/кг. Чему равно изменение внутренней энергии бензола массой 20 г при его испарении при этой температуре?

**5.281.** Давление насыщенных паров ртути при температурах  $t_1 = 100^\circ C$  и  $t_2 = 120^\circ C$  равно соответственно  $p_1 = 0,28$  мм рт. ст. и  $p_2 = 0,76$  мм рт. ст. Определите среднее значение удельной теплоты испарения ртути в указанном интервале температур.

**5.282.** Давление насыщенных паров этилового спирта ( $C_2H_5OH$ ) при температуре  $40^\circ C$  равно 133 мм рт. ст., а при температуре  $68^\circ C - 509$  мм рт. ст. Найдите изменение энтропии при испарении этилового спирта массой 1 г, находящегося при температуре  $50^\circ C$ .

**5.283.** Лед массой 1 кг с начальной температурой  $0^\circ C$  в результате нагревания превратили сначала в воду, а затем в пар при температуре  $100^\circ C$ . Найдите изменение энтропии системы.

**5.284.** Найдите изменение энтропии при превращении льда массой 10 г, находящегося при температуре  $-20^\circ C$ , в пар при температуре  $100^\circ C$ .

## 5.9. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**5.285.** На рисунке 5.14 изображена зависимость потенциальной энергии  $E_p$  взаимодействия двух соседних атомов кристаллической решетки от расстояния  $r$  между ними. Основываясь на этой зависимости, объясните природу теплового расширения твердых тел.

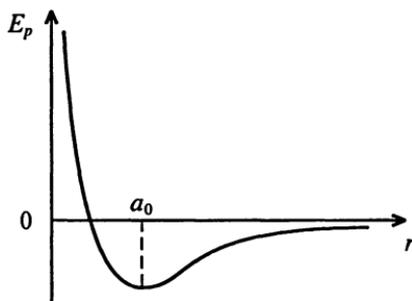


Рис. 5.14

**5.286.** На монете начерчена прямая линия. Останется ли она прямой, если монету нагреть?

**5.287.** Почему под действием солнечного света и воды разрушаются горные породы?

**5.288.** Как безопасно вынуть притертую стеклянную пробку из бутылки, если ее «заело»?

**5.289.** Медная трубка, подогретая от  $8$  до  $98^\circ C$ , удлинится на 1,53 мм. Определите начальную длину трубки.

**5.290.** Две линейки разной длины, одна медная, другая стальная наложены одна на другую так, что правые их концы совмещены. Длина медной линейки 24 см. Определите длину стальной линейки, если известно, что разность их длин не зависит от температуры.

**5.291.** Укладка железнодорожного пути проводилась при температуре  $12^\circ C$ . Какие наибольшие зазоры на стыке двух рельсов надо ос-

твлять, если температура почвы в данной местности колеблется от  $-35$  до  $42$  °С, а длина рельса  $12,5$  м?

**5.292.** Стальная струна, площадь поперечного сечения которой  $S = 1$  мм<sup>2</sup>, натянута силой  $F = 100$  Н при температуре  $t = 20$  °С. Какой будет сила натяжения струны при температуре  $t_0 = 0$  °С? На сколько процентов изменится при этом частота основного тона струны?

**5.293.** Концы стального стержня, площадь сечения которого  $S = 6$  см<sup>2</sup>, наглухо заделаны в стены при температуре  $t_1 = 10$  °С. С какой силой он будет давить на стены при повышении температуры до  $t_2 = 30$  °С?

**5.294.** Часы, маятник которых состоит из небольшого груза, подвешенного на легком стальном стержне, отрегулированы при температуре  $20$  °С. На сколько они уйдут вперед за сутки, если температура понизится до  $0$  °С?

**5.295.** Чтобы деревянное колесо стянуть по ободу стальной шиной, ее нужно нагреть до  $400$  °С. Во сколько раз диаметр колеса больше диаметра шины при температуре  $20$  °С?

**5.296.** Почему металлические предметы, находящиеся в комнате, на ощупь кажутся более холодными, чем деревянные?

**5.297.** Пассажирам поезда принесли чай. Один из них сразу положил в него сахар, другой после того, как был закончен ужин. Какой из них будет пить более горячий чай?

**5.298.** Стена дома состроит из двух слоев с разной теплопроводностью. Ход температуры внутри стены показан на рисунке 5.15. Какой слой, наружный (2) или внутренний (1), обладает большей теплопроводностью?

**5.299.** Два стержня длиной  $l_1$  и  $l_2$  с одинаковой площадью поперечного сечения изготовлены из разных материалов с теплопроводностями  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ . Стержни соединены основаниями и зажаты между двумя параллельными стенками, температуры  $T_1$  и  $T_2$  которых поддерживаются постоянными (рис. 5.16). Определите: а) температуру в месте стыка, б) тепловой поток через бруски.

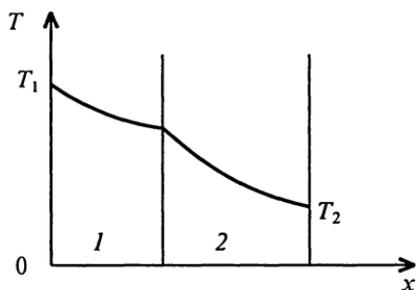


Рис. 5.15

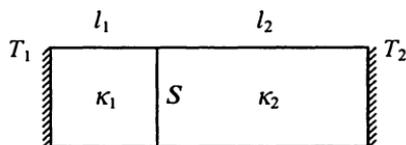


Рис. 5.16

**5.300.** Два стержня одинаковой длины  $l$  и разной площадью сечений  $S_1$  и  $S_2$ , сделанные из разных материалов с теплопроводностями  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ , зажаты между двумя стенками, температуры  $T_1$  и  $T_2$  которых поддерживаются постоянными (рис. 5.17). Найдите тепловой поток, переносимый от стенки к стенке через стержни.

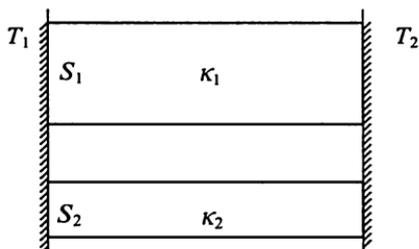


Рис. 5.17

**5.301.** Наружная поверхность кирпичной стены толщиной 37 см имеет температуру  $-17^\circ\text{C}$ , а внутренняя поверхность – температуру  $+20^\circ\text{C}$ . Определите количество теплоты, проходящей за сутки через поверхность стены площадью  $1\text{ м}^2$ .

**5.302.** Температура воздуха в комнате у оконного стекла  $+20^\circ\text{C}$ , а на улице  $-20^\circ\text{C}$ . Оцените тепловой поток, переносимый через окно посредством теплопроводности, если площадь окна  $3\text{ м}^2$ , ширина воздушного зазора между наружным и внутренним стеклами 10 см, толщина оконного стекла 2 мм. Каким был бы этот поток, если бы отсутствовало внутреннее стекло?

**5.303.** Цилиндрический паропровод окружен асбестовой теплоизолирующей оболочкой, вплотную прилегающей к теплопроводу. Наружная поверхность оболочки имеет температуру  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ , внутренняя – температуру  $t_2 = 120^\circ\text{C}$ . Наружный диаметр оболочки  $d_2 = 13\text{ см}$ , внутренний –  $d_1 = 7\text{ см}$ . Определите количество теплоты, отдаваемой паропроводом в окружающее пространство в течение суток. Длина паропровода  $l = 65\text{ м}$ .

**5.304.** Температура газов в топке парового котла равна  $1000^\circ\text{C}$ , температура воды в котле равна  $180^\circ\text{C}$ . Железные стенки котла имеют толщину 2 см; они покрыты с внутренней стороны слоем накипи толщиной 2 мм, с наружной стороны – слоем сажи толщиной 1 мм. Определите температуру внутренней и наружной поверхности железной стенки котла.

**5.305.** Медный кофейник стоит на электроплитке. Вода в нем доведена до кипения и каждую минуту образуется 2 г пара. Толщина дна кофейника 2 мм, а площадь –  $300\text{ см}^2$ . Определите разность температур между наружной и внутренней поверхностями дна кофейника, предполагая, что дно прогревается равномерно.

**5.306.** Энергия, выделяемая при радиоактивных процессах внутри Земли, проникает наружу. Для приближенного расчета можно принять средний градиент температуры внутри коры Земли под океаном равным  $0,07\text{ К/м}$ , а ее среднюю теплопроводность  $0,84\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Найдите тепловой поток через поверхность площадью  $1\text{ м}^2$ . Используя

найденное значение поверхностной плотности теплового потока, определите количество теплоты, переносимой через поверхность Земли за сутки.

**5.307.** Пруд покрыт слоем льда толщиной 5 см. Через какое время толщина льда станет равной 10 см, если считать, что температура воздуха постоянна и составляет  $-10^\circ\text{C}$ ? Теплопроводность льда  $2,23 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

**5.308.** Покажите, что радиальный тепловой поток  $\Phi$  в веществе между двумя сферическими поверхностями, имеющими радиусы  $r_1$  и  $r_2$  и температуры  $T_1$  и  $T_2$ , определяется соотношением:

$$T_1 - T_2 = \frac{\Phi}{4\pi k l} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где  $l$  – интервал времени,  $k$  – теплопроводность. Получите аналогичную формулу для теплового потока между двумя цилиндрическими поверхностями.

**5.309.** На основе закона Дюлонга – Пти вычислите удельные теплоемкости серебра и свинца. Сравните с табличными значениями.

**5.310.** Какой была бы удельная теплоемкость серебра, если бы вклад свободных электронов в теплоемкость учитывался в рамках классической физики?

**5.311.** Покажите, что при высоких температурах формула Планка для средней энергии квантового осциллятора дает такой же результат, что и классическая теория.

**5.312.** Покажите, что для линейной цепочки из одинаковых атомов, расположенных на расстоянии  $a$  друг от друга (такую цепочку можно назвать «одномерным кристаллом»), температура Дебая  $\theta_D = hv/(2ak)$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $v$  – скорость упругих волн вдоль цепочки,  $k$  – постоянная Больцмана.

**5.313.** Покажите, что теплоемкость одномерного кристалла в приближении Дебая пропорциональна  $T/\theta_D$ , где  $\theta_D$  – температура Дебая,  $T$  – абсолютная температура кристалла.

## Ответы

### 1. МЕХАНИКА

$$1.1. v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2}; v_{\text{ср}} = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}.$$

$$1.2. v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 35 \text{ м/с}; |\vec{v}_{\text{ср}}| = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}{2} = 25 \text{ м/с};$$

$$s = \frac{v_1 + v_2}{2} t = 1,4 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

$$1.3. t = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} = 2 \text{ мин}.$$

$$1.4. |\vec{v}_{\text{отн}}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 50 \text{ км/ч}; s = 150 \text{ км}.$$

$$1.5. t_{\text{min}} = \frac{v_1 d_1 + v_2 d_2}{v_1^2 + v_2^2}; d_{\text{min}} = \frac{|d_1 v_2 - d_2 v_1|}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}.$$

1.6. Картина не изменится.

1.7. 1 и 2.  $v_2 > v_1$ . 3. Против течения под углом  $60^\circ$ . 4. На первую поездку требуется больше времени на 2,14 мин. 5. При  $v_2 = \frac{nv_1}{\sqrt{n^2 - 1}}$ .

1.8. Курс лодки должен составлять угол  $53^\circ$  с прямой, соединяющей пристани; 0,62 м/с.

$$1.9. \varphi = 105^\circ.$$

$$1.10. \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

$$1.11. \sin \alpha = \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}, \text{ где } \alpha - \text{ угол между курсами катера и лодки};$$

$$s_{\text{min}} = \frac{l}{k} \sqrt{k^2 - 1}.$$

1.16.  $a_x = -0,25 \text{ м/с}^2$ .

1.17. 30,6 м.

1.18.  $v = \sqrt{2gh} = 6,2 \text{ м/с}$ .

1.19. 2 с.

1.20.  $h_{\max} = 3gt^2 \approx 3 \cdot 10^3 \text{ м}$ ,  $v = gt\sqrt{6} \approx 240 \text{ м/с}$ .

1.21. Площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой, определяет половину разности квадратов скоростей, соответствующих конечному и начальному моментам движения. Начальная и конечная скорости равны

1.22.  $t = \frac{2v_0 - g\tau}{2g} = 2,25 \text{ с}$ ;  $h = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{g\tau^2}{8} = 30,3 \text{ м}$ .

1.23.  $v = v_0 \frac{l_0 - v_0 t}{\sqrt{(l_0 - v_0 t)^2 - h^2}}$ .

1.24. Траектория лодки состоит из ветвей двух парабол (рис. 1), описываемых уравнениями:

$$y = \sqrt{\frac{vdx}{u}} \text{ и } y' = d - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{vxd}{u}}; x_0 = \frac{ud}{2v}.$$

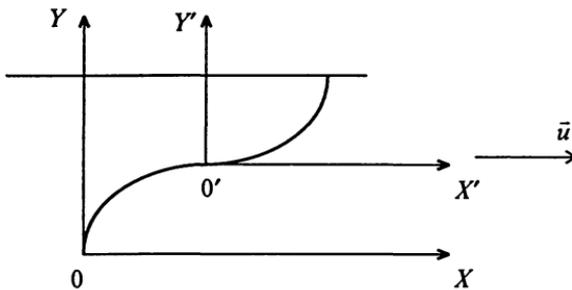


Рис. 1

1.26.  $x_1 - x_2 = l_0 - a\tau(t + \frac{\tau}{2}) = 240 \text{ м}$ .  $K$ -система должна двигаться навстречу поезду со скоростью  $v = 4 \text{ м/с}$ .

1.27. 1)  $x = v_0 \cos \alpha_0 t$ ;  $y = v_0 \sin \alpha_0 t - \frac{gt^2}{2}$ ; 2)  $v_x = v_0 \cos \alpha_0$ ;  
 $v_y = v_0 \sin \alpha_0 - gt$ ; 3)  $\tau = \frac{2v_0 \sin \alpha_0}{g}$ ; 4)  $s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha_0}{g}$ ; 5)  $h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}$ ;

$$6) y = x \operatorname{tg} \alpha_0 - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}; \quad 7) \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_0 \sin \alpha_0 - gt}{v_0 \cos \alpha_0};$$

$$8) a_n = g \cos \alpha_0, a_t = g \sin \alpha_0; \quad 9) R = \frac{[v_0^2 - 2gxt \operatorname{tg} \alpha_0 + \frac{g^2 x^2}{v_0^2 \cos^2 \alpha_0}]^{3/2}}{gv_0 \cos \alpha_0}.$$

1.28. 2. Второе тело относительно первого движется равномерно и прямолинейно. 3.  $l = v_0 t \sqrt{(1 - \sin \alpha)^2 + \cos^2 \alpha}$ .

$$1.31. \alpha = \arctg 4.$$

$$1.32. \operatorname{tg} \alpha = v \sqrt{\frac{2}{hg}}; \quad l = v \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

1.33. Относительно дороги мяч брошен со скоростью  $\vec{v}_0 - \vec{u}$  с высоты  $H$ . Траектория будет состоять из участков парабол (рис. 2).

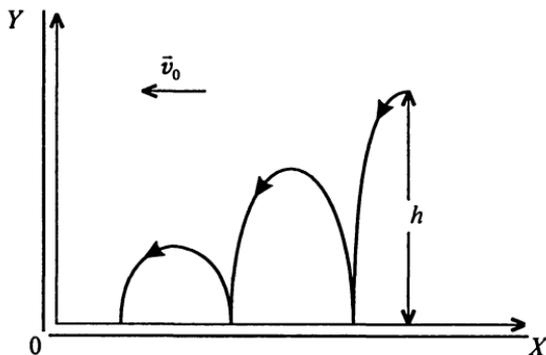


Рис. 2

$$1.34. \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_0 \sin \alpha_0 - gt}{v_0 \cos \alpha_0}; \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = 0,23; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = -0,77;$$

$$R = \frac{[(v_0 \sin \alpha_0 - gt)^2 + v_0^2 \cos^2 \alpha_0]^{3/2}}{gv_0 \cos \alpha_0}; \quad R_1 = 10,8 \text{ м}; \quad R_2 = 20,1 \text{ м}.$$

$$1.35. v_0 = \sqrt{\frac{Rg}{\cos \alpha_0}} = 20 \text{ м/с}; \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = 2 \frac{h}{R}; \quad \alpha_0 = 45^\circ.$$

1.36. Шарики будут располагаться на поверхности сферы радиусом  $v_0 t$ , центр которой в системе отсчета, связанной с Землей, движется с ускорением  $\vec{g}$  вниз.

1.37. а) Точка, прямая; б) окружность, спираль Архимеда; в) прямая, параллельная  $\vec{g}$ .

1.38.  $\omega = 2 \cdot 10^{-7}$  рад/с;  $a_n = 6 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>;  $v_{орб} = 30$  км/с.

1.39.  $\omega = 7,2 \cdot 10^{-5}$  рад/с;  $a_n = 3,34 \cdot 10^{-2} \cos \varphi$  м/с<sup>2</sup>;  $v = 4,6 \cdot 10^2 \cos \varphi$  м/с.

1.40.  $\omega_1/\omega_2 = 1$ .

1.41.  $T = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \approx 116$  земных суток.

1.42. Тень движется с запада на восток со скоростью

$$v = 2\pi \left( \frac{R_{\text{л}}}{T_{\text{мес}}} - \frac{R_3}{T_{\text{сут}}} \right) \approx 500 \text{ м/с, где } T_{\text{сут}} - \text{продолжительность суток, } T_{\text{мес}} -$$

продолжительность месяца.

1.43. 1. На круге будет видно четыре неподвижных размытых темных сектора, каждый около  $67^\circ$ . 2. Секторы будут казаться вращающимися с частотой  $0,5 \text{ с}^{-1}$  в сторону, противоположную направлению вращения круга.

1.46.  $\varepsilon = 4$  рад/с<sup>2</sup>;  $N = 6,4$ ;  $a_n = \varepsilon^2 \frac{2h}{a} R = 80$  м/с<sup>2</sup>;  $a_\tau = a$ ;  $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} \approx 80$  м/с<sup>2</sup>.

1.47.  $0,21$  рад/с<sup>2</sup>;  $240$  оборотов;  $149,5$  с;  $704$  м.

1.48.  $t = \sqrt{\frac{R}{a_\tau}} = 2$  с;  $N = \frac{a_\tau t^2}{4\pi R} = 0,16$ .

1.49.  $v_O = 0$ ,  $v_A = v_C = v_0 \sqrt{2}$ ,  $v_B = 2v_0$ . Полное ускорение колеса в любой момент времени равно  $a = \frac{v_0}{R}$ . В точке  $O$   $a_\tau = \frac{v_0^2}{R}$ ,  $a_n = 0$ , в точках

$A$  и  $C$   $a_n = a_\tau = \frac{a\sqrt{2}}{2}$  в точке  $B$   $a_\tau = 0$ ,  $a_n = \frac{v_0^2}{R}$ .

$x = v_0 t - R \sin \omega t$ ;  $y = R(1 - \cos \omega t)$ ,  $\omega = \frac{v_0}{R}$ .

1.50.  $h_{\text{max}} = R + \frac{v_0^2}{2g} + \frac{gR^2}{2v_0^2}$ ;  $\cos \varphi = -Rg / v_0^2$ , где  $\varphi$  – угловая координата искомой точки на ободе колеса.

1.51.  $S = \frac{\pi}{a} (R_1^2 - R_2^2) = 125,6$  м.

$$1.52. (v_{1,2})_x = \frac{s}{\tau} \left( 1 \pm \frac{R}{\sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}}} \right); v_{1x} = 1,40 \text{ м/с}, v_{2x} = -0,2 \text{ м/с}.$$

$$1.53. \omega = v_0 \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{r^2}} = 4,25 \text{ рад/с}; \operatorname{tg} \varphi = r/R, \varphi = 28^\circ.$$

$$1.54. a) \cos \varphi = \frac{A^2 - A_1^2 - A_2^2}{2A_1A_2}, \varphi = 84,3^\circ; б) v = \frac{v_1}{A_1} A = 0,9 \text{ м/с}.$$

1.56. Будут наблюдаться биения с частотой 0,5 Гц и амплитудой 0,2 мм.

1.57.  $\Delta\varphi_1 = 2\pi/3$ ,  $\Delta\varphi_2 = 2\pi/N$ , где  $N$  – число колебаний.

$$1.58. X_0 = x_0 \frac{\sin \frac{N\varphi_0}{2}}{\sin \frac{\varphi_0}{2}}; X_0 \text{ максимальна при } \varphi_0 = 2\pi \text{ и минимальна}$$

при  $\varphi_0 = 2\pi/N$ .

1.59. Точка движется по эллипсу, описываемому уравнением

$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$ . Годограф скорости – эллипс:  $\frac{x^2}{\omega^2 A^2} + \frac{y^2}{\omega^2 B^2} = 1$ ;  $a_x = -\omega^2 x$ ,  $a_y = -\omega^2 y$ , годограф ускорения также эллипс.

$$1.61. y^2 = 4 \left( x^2 - \frac{x^4}{a^2} \right).$$

1.81. 1.  $\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -1/\mu$ ;  $\alpha'_0 = 45^\circ$ ,  $\alpha''_0 = 52^\circ$ . 2.  $\mu = 0,27$ .

$$1.82. a_1 = g \left[ \sin \alpha - \mu_1 \cos \alpha + \frac{m_2}{m_1} (\mu_2 - \mu_1) \cos \alpha \right];$$

$a_2 = g (\sin \alpha - \mu_2 \cos \alpha)$ ; а)  $a_1 = a_2$ ; б)  $a_1 < a_2$ ; в) и г)  $a_1 = a_2$ ; д)  $a_1 = 0$ ,  $a_2 \neq 0$ .

$$1.83. F_{\text{сп}} = \frac{m\sqrt{2g}}{\tau} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}) = 28 \text{ Н}.$$

1.84.  $\operatorname{tg} \beta = \mu$ .

$$1.85. a) F = \frac{(\mu_1 - \mu_2)m_1 m_2 g \cos \alpha}{m_1 + m_2}; б) \operatorname{tg} \alpha_{\min} = \frac{\mu_1 m_1 + \mu_2 m_2}{m_1 + m_2}.$$

$$1.86. a = \frac{g \sin 2\alpha}{2 \left( \sin^2 \alpha + \frac{m_1}{m_2} \right)}.$$

$$1.87. F > \mu g(M - m); t = \sqrt{\frac{2lM}{F - (m + M)g\mu}}.$$

$$1.88. \text{ а) } \alpha = 0, T = mg; \text{ б) } \alpha = \arctg \frac{a}{g}, T = m\sqrt{a^2 + g^2};$$

в)  $\alpha = \varphi, T = mg \cos \varphi$ , т.е. нить перпендикулярна к наклонной плоскости;

$$\text{ г) } \operatorname{tg} \alpha = \frac{b \cos \varphi}{g + b \sin \varphi}, T = m\sqrt{g^2 + b^2 + 2bg \sin \varphi};$$

д)  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{-b \cos \varphi}{g - b \sin \varphi}$ , угол  $\alpha$  положителен при отклонении нити маятника от вертикали в направлении хода часовой стрелки;

$$T = m\sqrt{g^2 + b^2 - 2bg \sin \varphi}.$$

1.89. Если сопротивление воздуха отсутствует, то результирующая сила, обусловленная действием пружин, равна 0. Если сопротивлением нельзя пренебречь, то результирующая сила равна  $m(\bar{a} - \bar{g})$ , где  $\bar{a}$  – ускорение снаряда. При подъеме эта сила направлена вниз, при спуске – вверх.

$$1.90. v_0 < \sqrt{gR}; \cos \varphi = \frac{2Rg + v_0^2}{3Rg}; v = \sqrt{\frac{2(gR + v_0^2)}{3}}.$$

1.91.  $P_{1,2} = \frac{mv^2}{R} \pm mg$ , «+» относится к нижней точке, «-» – к верхней.  $P_1 = 5,6 \cdot 10^3 \text{ Н}, P_2 = 4,0 \cdot 10^3 \text{ Н}.$

$$1.92. r = \frac{v^2}{g \operatorname{tg} \alpha}.$$

$$1.93. \omega = \sqrt{\frac{g}{\sqrt{(R+l)^2 - (R+r)^2}}}.$$

1.94.  $F = P + m\omega^2 R = 9,794 \text{ Н}; P' = 6,33 \text{ Н}; \omega = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с} = 17 \omega_0$ , где  $\omega_0$  – угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси.

1.95. Затормозить.

1.96.  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{Rg}$ , где  $\alpha$  – угол наклона полотна к горизонту,  $v$  – скорость поезда,  $R$  – радиус закругления.

1.97. Пол комнаты представляет собой параболоид вращения, описываемый уравнением  $z = \frac{\omega^2}{2g}(x^2 + y^2)$ , ось  $z$  направлена по оси вращения, начало координат в нижней точке, а оси  $x$  и  $y$  лежат в горизонтальной плоскости.

1.98. Параболоид вращения.

1.99.  $T = P(3 - 2\cos \alpha) \approx 1,6 P$ .

1.100.  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 1/2, \alpha \approx 53^\circ$ .

1.102. Если  $\omega^2 R > g$ , то имеется два положения равновесия:  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = \arccos(g/\omega^2 R)$ . При появлении второго положения равновесия (оно всегда устойчиво) нижнее положение становится неустойчивым. Если  $\omega^2 R < g$ , то положение равновесия возможно только при  $\varphi_1 = 0$ .

1.103.  $a = 4kgh; F = (1 + 4kh)mg$ .

1.104.  $a = \frac{M}{M + m_1 + m_2 + m_3} g; T_1 = (m_1 + m_2 + m_3) a; T_2 = (m_2 + m_3) a;$

$T_3 = m_3 a$ .

1.105. Машина Атвуда станет легче на  $\Delta P = (m_1 + m_2) g - \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$ .

1.106. а)  $\frac{m_2}{m_1} > (\sin \alpha + \mu \cos \alpha), a = \frac{m_2 - m_1(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{m_1 + m_2} g,$

$T = m_2(g - a);$  б)  $\frac{m_2}{m_1} < (\sin \alpha - \mu \cos \alpha), a = \frac{m_1(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - m_2}{m_1 + m_2} g,$

$T = m_2(g + a);$  в)  $(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) < \frac{m_2}{m_1} < (\sin \alpha + \mu \cos \alpha), T = m_2 g.$

1.107.  $a_1 = \frac{2m_1 - m_2}{2m_1 + m_2/2} g; a_2 = \frac{a_1}{2},$  направлены эти ускорения в про-

тивоположные стороны;  $T = \frac{3m_1 m_2}{4m_1 + m_2} g.$

1.108.  $a_1 = \frac{m_1(m_1 + m_2) - 4m_2 m_3}{m_1(m_2 + m_3) + 4m_2 m_3} g; T_1 = \frac{8m_1 m_2 m_3 g}{m_1(m_2 + m_3) + 4m_2 m_3};$

$T_2 = \frac{4m_1 m_2 m_3 g}{m_1(m_2 + m_3) + 4m_2 m_3}.$

$$1.109. \bar{a} = -\frac{r}{m} \bar{v}_0 e^{-r/m}; \quad \bar{v} = \bar{v}_0 e^{-r/m}; \quad s = \frac{m}{r} v_0 (1 - e^{-r/m}).$$

1.110. При движении тела вверх:

$$v = \frac{mg}{r} \left[ \left( \frac{v_0 r}{mg} + 1 \right) e^{-r/m} - 1 \right]; \quad y = \frac{mg}{r} \left[ \frac{m}{r} \left( \frac{v_0 r}{mg} + 1 \right) (1 - e^{-r/m}) - t \right];$$

$$a = -g e^{-r/m} \left( \frac{v_0 r}{mg} + 1 \right); \quad t = \frac{m}{r} \ln \left( \frac{v_0 r}{mg} + 1 \right).$$

При движении тела вниз:

$$v = \frac{mg}{r} (1 - e^{-r/m}); \quad y = y_0 - \frac{mg}{r} \left[ t + \frac{m}{r} (e^{-r/m} - 1) \right]; \quad a = g e^{-r/m}.$$

$$1.111. 1,8 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

$$1.112. t = \frac{h(v_0 - v_1)}{v_0 v_1 \ln \frac{v_0}{v_1}}.$$

$$1.113. s = \frac{bt^3}{6m} - \frac{\mu g t^2}{2}.$$

1.114.  $v = v_0 (1 - e^{-r/m})$ , где  $v_0$  – скорость установившегося движения,

$$v_0 = \frac{mg}{r} = 4,5 \text{ м/с}, \quad n = \frac{\sqrt{2gh}}{v_0} \approx 31.$$

$$1.115. x = v_0 v \frac{m}{r} (1 - e^{-r/m}).$$

При движении вверх:  $y = \frac{mg}{r} \left[ \frac{m}{r} \left( \frac{v_{0y} r}{mg} + 1 \right) (1 - e^{-r/m}) - t \right];$

при движении вниз:  $y = y_0 - \frac{mg}{r} \left[ t + \frac{m}{r} (e^{-r/m} - 1) \right]; \quad v_{0x} = v_0 \cos \alpha,$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

$$1.120. N_{\text{ср}} = \frac{mg}{2} \sqrt{2gh_0}; \quad N = mg \sqrt{gh_0}.$$

$$1.121. \text{ а) } A = 0; \text{ б) } A = -F_{\text{тр}} \frac{t^2}{2} (a_1 - a_2), \text{ где } t - \text{ время движения.}$$

$$1.122. A = 0.$$

$$1.129. v_1 = v_2; \quad \frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}.$$

$$1.131. h_1 = h_2.$$

$$1.133. h = \frac{2mg}{k} \quad (h \text{ отсчитывается от начального положения тел}).$$

Тело будет совершать колебательное движение относительно положения равновесия, определяемого условием  $kx_0 = mg$  ( $x_0$  отсчитывается от положения равновесия нерастянутой пружины).

$$1.134. A = -\mu mg l (1 - \mu \operatorname{ctg} \alpha) = -0,05 \text{ Дж.}$$

$$1.135. N = \frac{mv_0^3}{4l}.$$

$$1.136. \text{ а) } 0,02; \text{ б) } 46 \text{ Вт.}$$

$$1.137. 2,5 \text{ кВт.}$$

$$1.138. A = \frac{ma^4 t^2}{8}.$$

$$1.139. A_{\min} = \frac{1}{2} (k\Delta x)^2, \text{ где } k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}.$$

$$1.140. 2\bar{E}_k = \bar{E}_p.$$

$$1.141. 1. h_1 = \frac{h}{3} \left( 2 + \frac{R}{h} \right); 2. h_2 = \frac{5}{2} R; 3. h_3 = 3R.$$

1.142.  $F_k = mv_0^2 (1 - \cos \alpha)$ , где  $\alpha$  – угол между нитью и перпендикуляром к направлению скорости движения системы отсчета. Изменение энергии происходит за счет работы силы натяжения нити.

$$1.149. a_C = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 g. \text{ Силы тяжести, действующие на грузы, и}$$

сила упругости, действующая на ось блока со стороны его подвеса, являются внешними, сила натяжения нити и сила давления на ось блока со стороны натянутой нити являются внутренними.

$$1.150. \text{ а) } X = b \frac{m_2 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}; Y = a \frac{m_3 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}; \text{ начало ко-}$$

ординат находится в точке, где расположено тело массой  $m_1$ , ось  $X$  совпадает с линией, соединяющей тела массой  $m_1$  и  $m_2$ ;

$$\text{ б) } X = \frac{m_1 a}{2(m_1 + m_2)}; Y = \frac{m_2 b}{2(m_1 + m_2)}, \text{ начало координат находится в}$$

месте соединения тел;

$$\text{ в) } X = \frac{r^2 a}{R^2 - r^2}, \text{ ось } X \text{ проходит через центры круглой пластинки и}$$

выреза; начало отсчета находится в центре круглой пластинки.

1.151.  $x = R/\pi$ , центр масс лежит на оси фигуры, расстояние отсчитывается от центра полукруга.

1.152. На расстоянии, равном  $\frac{3}{4}h$ .

1.153.  $x = R/2$

1.154. а)  $p_{1,2} = \mu\sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ ; б)  $E_k = \frac{1}{2}\mu(v_1^2 + v_2^2)$ , где  $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ .

1.156. 210 см.

1.157.  $v_{01} = \frac{m}{m_1}v_2 = 0,9$  м/с;  $v_{02} = \frac{m_2 + m}{m_2 - \frac{m^2}{m_1}}v_2 = 9$  м/с.

1.158.  $s_2 = s_1 \left\{ \sqrt{\frac{2g}{h} \left[ \frac{h}{g\tau} - \frac{\tau}{2} + \sqrt{\frac{2h}{g} + \left( \frac{h}{g\tau} - \frac{\tau}{2} \right)^2} \right]} + 1 \right\}$ ;

$$X = s_1 + s_1 \sqrt{\frac{g}{2h}}\tau, \quad Y = h - \frac{g\tau^2}{2}; \quad x_2 = s_1 + 2s_1 \sqrt{\frac{g}{2h}}\tau, \quad y_2 = 2 \left( h - \frac{g\tau^2}{2} \right).$$

1.159.  $v = \frac{(M + m)\sqrt{2gl \sin \alpha}}{m \cos \alpha}$ .

1.160.  $r = \frac{g}{\omega^2} \operatorname{tg} \alpha$ ;  $T = \frac{mg}{\cos \alpha}$ .

1.161.  $\omega \leq \sqrt{\frac{8T}{\rho l^2}}$ .

1.162.  $h = \frac{v_c^2 \sin^2 \alpha}{2g} = 7,5$  м, где  $v_c = \frac{v_1 - v_2}{2}$ .

1.163.  $F \geq 2mg$ ;  $h = \left( 1 + \frac{k\Delta l}{mg} \right) \frac{mg}{k} = \frac{8mg}{k}$ .

1.164.  $h = \frac{v^2}{2g} \left( \frac{M - m}{M} \right)$ .

1.165.  $v_c = \frac{x\sqrt{km_2}}{m_1 + m_2}$ .

1.166. а)  $l_{\max} = l_0 + \frac{F}{k}$ ;  $l_{\min} = l_0$ ; б)  $l_{\max} = l_0 + \frac{2m_1 F}{k(m_1 + m_2)}$ ;  $l_{\min} = l_0$ .

1.168. Скорость тележки в обоих случаях одинакова,  $v_T = \frac{mv}{M+m}$ , но во втором случае часть энергии переходит в энергию вращательно-го движения.

1.169. а)  $\vec{v}'_1 = \vec{v}_2, \vec{v}'_2 = \vec{v}_1$ ; б)  $\vec{v}'_1 = 2\frac{m_2}{m_1}\vec{v}_2 \approx 0, \vec{v}'_2 = -\vec{v}_2(1 - 2\frac{m_2}{m_1}) \approx -\vec{v}_2$ ;

в)  $\vec{v}'_1 \approx 2\vec{v}_2, \vec{v}'_2 \approx -\vec{v}_2$ .

1.174.  $E_p = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)^2$ .

1.175. После соударения второй шар отскочит назад;  $v' = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v$ .

$$A = \frac{2m_2 v}{m_1 + m_2} \sqrt{\frac{m_1}{k}}$$

1.176.  $p = 2mv \cos \alpha$ .

1.177.  $\Delta E_k = 2m(v-u)u$ ;  $\Delta \vec{p} = -2m(\vec{v} - \vec{u})$ . Тело после удара остановится, если  $u = v/2$ .

1.178.  $\frac{\Delta E_k}{E_k} = 4 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}$ . Полная энергия максимальна при  $m_1 = m_2$ .

1.179.  $\sin \theta = \frac{m_1}{m_2}$ , где  $m_2$  – масса атома водорода,  $m_1$  – масса налетающей частицы. Для  $\alpha$ -частицы  $\sin \theta = 1/4$ , для дейтрона  $\sin \theta = 1/2$ .

1.180. Масса  $\alpha$ -частицы должна быть меньше массы ядра;

$$v = v_0 \sqrt{\frac{M-m}{M+m}}, v_y = \frac{mv_0}{M} \sqrt{\frac{M-m}{M+m}}, \operatorname{tg} \theta = \sqrt{\frac{M-m}{M+m}}$$

1.182.  $-\frac{\bar{v}}{5}; \frac{2\sqrt{3}}{5}\bar{v}$ .

1.183. а)  $E_k = \frac{(mv)^2}{2(M+m)}$ ; б)  $E_{\text{вн}} = \frac{Mmv^2}{2(M+m)}$ ; в)  $A = v \sqrt{\frac{MmE_k}{(M+m)}}$ ;

г)  $v' = \frac{m-m_1}{m+m_1} v$ .

1.188.  $a = \frac{F}{m_0 - \mu t}$ ;  $v = \frac{F}{M} \ln \frac{m_0}{m_0 - \mu t}$ .

$$1.189. v = \frac{Ft}{m_0(1 + \mu t / m_0)}; a = \frac{F}{m_0(1 + \mu t / m_0)^2}.$$

$$1.190. \bar{v} = -\bar{u} \ln \frac{m_0}{m}.$$

1.192.  $\frac{m_0}{m} = 5 \cdot 10^{3327}$ . Для ориентировки заметим, что масса Галактики  $\approx 3 \cdot 10^{41}$  кг, Метагалактики  $\approx 10^{53}$  кг. Этот пример показывает абсолютную непригодность ракет на химическом топливе в качестве звездолетов.

$$1.193. \alpha = \frac{u}{v_0} \ln \frac{m_0}{m}.$$

$$1.194. v = u \ln \frac{m_0}{m} - gt; \mu = -\frac{dm}{dt} = \frac{m_0 g}{u} e^{-\frac{gt}{u}}.$$

$$1.205. \text{а) } I = \frac{m}{3l} \sin^2 \alpha [(l-a)^3 + a^3]; \text{б) } I = \frac{4}{3} ml^2 + 4m_2 a^2 + \frac{mr^2}{2};$$

$$\text{в) } I_1 = \frac{3}{8} ma^2; I_2 = \frac{ma^2}{12}; \text{г) } I = \frac{m_1 r_1^2}{2} + m_3 R^2 + \frac{2}{5} m_4 r^2 + m_4 R^2 + N \frac{m_2 d^2}{3}.$$

1.206.  $v = \frac{5}{4} \frac{hc^2 \cdot 4\pi\epsilon_0}{e^2} \approx 4 \cdot 10^{10}$  м/с,  $v \gg c$  ( $v$  – скорость на поверхности шарика,  $c$  – скорость света).

$$1.207. 10 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}; \approx 10 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$1.209. 1. a_1 = \frac{2(M+m)r^2}{mr^2 + MR^2 + 2(M+m)r^2} g; 2. T_1 = \frac{a_1}{4r^2} (mr^2 + MR^2);$$

$$3. E_k = (m+M)gh; v_c = 0; 4. T = \frac{m+M}{2} g; \bar{a} = \bar{a}_1.$$

$$1.210. a = \frac{2(m+M)}{m+M+\frac{I}{r^2}} g, \text{ где } I - \text{ момент инерции диска и валика, а } M - \text{ их масса.}$$

$$1.211. \beta = \frac{m_2 R_2 - m_1 R_1}{m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + I} g; T_1 = m_1(\beta R_1 + g); T_2 = m_2(g - \beta R_2);$$

$$F = T_1 + T_2 + m_3 g; a_1 = \beta R_1; a_2 = \beta R_2.$$

$$1.212. a = \frac{5}{7}g \sin \alpha; F_{\text{тр}} = \frac{2}{7}mg \sin \alpha; \operatorname{tg} \alpha < \frac{7}{2}\mu.$$

$$1.213. a = \frac{F(R \cos \alpha - r)R}{I + mR^2}, F_{\text{тр}} = F \cos \alpha - ma.$$

$$1.214. a = 1,14g \sin \alpha.$$

$$1.215. a = \left(1 + \frac{3}{8} \frac{m_1}{m_2} + \frac{I}{m_2 r^2}\right)^{-1} g; \mu \geq \left(1 + \frac{m_1}{m_2} + \frac{8}{3} \frac{I}{m_2 r^2}\right)^{-1}.$$

$$1.216. a = \frac{F}{2m + \frac{2I}{R^2} + \frac{2\mu R^2 m + I}{R^2 (1 - \mu)}} = \frac{2F(1 - \mu)}{3m}.$$

1.217. Скольжение начнется на высоте  $0,8R$  от горизонтального диаметра цилиндрической поверхности.

$$1.218. a \leq g \frac{k}{R}, \text{ где } k - \text{ коэффициент трения качения.}$$

$$1.219. H = 2,7R.$$

$$1.220. \omega = \frac{5}{7} \frac{v_0}{r}; A = \Delta E_k = \frac{mv_0^2}{7}.$$

$$1.221. v = \frac{Ir}{I + mr^2} \omega_0 = \frac{2}{7} \omega_0^2; \Delta E_k = \frac{1}{2} \frac{mr^2}{I + mr^2} I \omega_0^2 = \frac{1}{7} mr^2 \omega_0^2.$$

$$1.222. v = \sqrt{3gl}.$$

$$1.223. F_x = \frac{3}{2}mg, F_y = \frac{1}{4}mg.$$

1.224. Лозу следует рубить участком сабли, отстоящим на  $2/3$  от ручки сабли.

$$1.225. F = \left(1 + \frac{4a^2 m}{I}\right) mg, \text{ где } m - \text{ масса гимнаста, } I - \text{ его момент}$$

инерции относительно перекладины,  $a$  – расстояние между осью вращения и центром масс гимнаста.

$$1.226. \text{ а) } \beta = \frac{2(m_1 - m_2)}{l(m_1 + m_2)} g; F = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g; \text{ б) } \omega = 2 \sqrt{\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \frac{g}{l}},$$

$$F = \frac{3(m_1^2 + m_2^2) - 2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$$

1.228. а) Скорость вращения и кинетическая энергия возрастут в  $\left(1 + \frac{mR^2}{I}\right)$  раз; б)  $n_1 = n - \frac{mr}{mr^2 + I} \frac{v}{2\pi}$ ;  $E_k = \frac{(I + mr^2)}{2} 4\pi^2 n_1^2 + \frac{mv^2}{2}$ .

1.229. а)  $\Delta E_k = \frac{2I_1^2 \omega^2}{I_2}$ ; б)  $\Delta E_k = \frac{I_1^2 \omega^2}{2I_2}$ .

1.230.  $A = \frac{m}{2} \frac{g}{l_0} r_0^2 (\sqrt{2} - 1)$ .

1.231.  $T \approx T_0 (\rho_0 / \rho)^{2/3} = 1,3 \cdot 10^{-3}$  с.

1.232.  $\omega_1 = \frac{mr^2}{mr^2 + 2ma^2 + MR^2} \omega$ .

1.233.  $\omega'_1 = \frac{3l^2 - L^2}{3l^2 + L^2} \omega_1$ ,  $\omega'_2 = \frac{6l^2}{L^2 + 3l^2} \omega_1$ , где  $\omega'_1, \omega'_2$  – угловые скорости шарика и стержня после соударения;  $\omega_1 = \left[ \frac{2g}{l} (1 - \cos \varphi) \right]^{1/2}$ ;  $\omega'_1 = 0$ ,

если  $l = \frac{L}{\sqrt{3}}$ .

1.234. а) Пластика будет вращаться с угловой скоростью

$\omega = \frac{12m}{4m + 3m_0} \frac{v}{a}$ , а шар полетит в противоположную сторону со скоростью

$v_1 = \frac{3m_0 - 4m}{3m_0 + 4m} v$ ; б) пластика с прилипшим шаром будет вращаться с угловой скоростью  $\omega = \frac{6m}{3m_0 + 4m} \frac{v}{a}$ .

1.235. Пластика будет вращаться с угловой скоростью

$\omega_1 = \frac{2m_0}{ma} (v - v_1)$ .

1.236.  $v_2 = \frac{2M}{3m + M} \sqrt{3gl}$ ;  $\omega'_1 = \frac{M - 3m}{3m + M} \sqrt{\frac{3g}{l}}$ ;  $\omega''_1 = \frac{M}{3m + M} \sqrt{\frac{3g}{l}}$ .

1.238.  $v'_1 = \frac{2}{7} v_1$ ;  $v'_2 = \frac{5}{7} v_1$ ;  $Q = \frac{20}{49} \frac{mv_1^2}{2}$ .

1.239.  $v = \frac{5}{7} \frac{m}{M} v_0$ .

**1.240.** Шар будет двигаться равномерно, если точка удара лежит выше его центра на расстоянии  $2/5$  радиуса. Такие удары называются нормальными. Если она лежит еще выше, то движение шара будет ускоренным, если точка лежит ниже, то движение будет замедленным. Соответствующие удары называют высокими и низкими. Решение выполнено в предположении, что сила трения шара о плоскость стола пренебрежимо мала по сравнению с силой удара кия по шару.

**1.241.** Случай а) реализуется при высоких ударах, б) – при нормальных, в) – при низких (см. ответ к задаче 1.240).

$$1.242. M = \frac{2\pi I n u}{R} = 612 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$1.243. F = mg + \frac{1}{2} m \frac{v^2}{R^2} r.$$

1.245. Не может.

1.246.  $F = \frac{\sqrt{10}}{4} mg \approx 7,8 \cdot 10^3 \text{ Н}$ , причем проекция вектора силы на ось  $Y$ , направленную вниз, равна  $\frac{3}{4} mg$ , а проекция вектора силы на ось  $X$ , направленную к стене, равна  $-\frac{1}{4} mg$ ;  $T = \frac{mg}{2\sqrt{2}}$ .

$$1.247. m_2 = m_1 \frac{\sin \alpha}{\sin(\frac{l}{R} - \alpha)}.$$

1.248. Разумно. Если удалить канат  $D$ , сила натяжения, действующая на канат  $C$ , уменьшится в  $7/6$  раза.

$$1.249. \operatorname{tg} \alpha \geq \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{2\mu_1}.$$

$$1.250. A = -\frac{\mu mg l}{2}.$$

1.252. Нет. Сигнал со 2-й ракеты достигнет 3-й ракеты раньше, чем 1-й.

$$1.256. \text{ а) } \Delta t' = \frac{1}{c} \sqrt{(ct_B - ct_A)^2 - (x_B - x_A)^2}, \quad v = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A};$$

б)  $\Delta x' = \sqrt{(x_C - x_A)^2 - (ct_C - ct_A)^2}$ ,  $v = \frac{c(ct_C - ct_A)}{x_C - x_A}$ . События  $A$  и  $B$  могут быть связаны причинной связью, события  $A$  и  $C$  – нет.

$$1.261. \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

$$1.262. \rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

$$1.263. n = \frac{n_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

$$1.264. s = \frac{v\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

$$1.265. \text{ а) } v_{\text{сбл}} = 2v_0 = 1,4c; \text{ б) } v_{\text{сбл}} = \frac{2v_0}{1 + \frac{v_0^2}{c^2}} = 0,94c.$$

$$1.266. \text{ а) } v = v_0\sqrt{2}; \text{ б) } v = v_0\sqrt{2 - \frac{v_0^2}{c^2}}.$$

1.268. Погрешность в постановке задачи заключается в том, что обе ситуации, рассмотренные в задаче, считаются одновременными в обеих системах отсчета, что неверно.

$$1.271. v = \frac{1}{2}c\sqrt{3} = 2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

1.272. В классической механике  $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ , в релятивистской –

$$v = c\sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{eU + mc^2}\right)^2}.$$

$$1.273. R = \frac{mv}{eB\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; n = \frac{eB\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{2\pi m}.$$

$$1.274. m = \frac{1}{c}\sqrt{2m_0(E_k + 2m_0c^2)}; v = c\sqrt{\frac{E_k}{(E_k + 2m_0c^2)}}.$$

$$1.275. E = 2m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right).$$

1.280. а)  $\operatorname{tg} \alpha = \mu$ ; б)  $\mu = \frac{g \sin \alpha \pm \dot{a} \cos \alpha}{g \cos \alpha \mp a \sin \alpha}$ , знак « $\pm$ » зависит от направления ускорения наклонной плоскости.

$$1.281. T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}}.$$

$$1.282. \Delta t = \sqrt{\frac{l}{2mad}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{\sin \alpha}} = 1,855 \sqrt{\frac{l}{mad}}.$$

$$1.283. a = \frac{\mu g}{2 \left( 1 - \frac{\mu h}{l} \right)}.$$

$$1.284. \text{ а) } F_y = \frac{GmM}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi, F_x = m\omega^2 R \sin \varphi \cos \varphi;$$

$$\text{ б) } F_y = \frac{GmM}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi - 2mv\omega \cos \varphi,$$

$$F_x = m\omega^2 R \sin \varphi \cos \varphi + 2mv\omega \sin \varphi;$$

$$\text{ в) } F_y = \frac{GmM}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi, F_x = m\omega \sin \varphi \sqrt{\omega^2 R^2 \cos^2 \varphi + 4v^2}.$$

1.285. Паровоз действует на правый по ходу поезда рельс железнодорожного пути с силой  $F = 2mv\omega \sin \varphi \approx 250$  Н, где  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли.

1.286.  $v_0 = \frac{2ml\omega}{m+M}$  ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли), скорость пушки направлена на запад.

$$1.287. 0,0209 \text{ рад} \approx 1,2^\circ.$$

$$1.291. T = 2\pi \sqrt{\frac{l/R^2 + m}{k}}; x_0 > \frac{mg}{k}.$$

$$1.292. T = 2\pi \sqrt{\frac{l^2 + 12x^2}{12xg}}, \text{ где } x \text{ – расстояние от оси до центра масс}$$

$$\text{ стержня. } T_{\min} = 1,5\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

$$1.293. \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{1,5(R-r)}}.$$

$$1.294. T = 2\pi\sqrt{\frac{r^2 + 2a^2}{2ga}}.$$

1.295.  $F = -mg - ma\omega^2 \cos \omega t$ ;  $F = -0,98 - 0,32 \cos 4\pi t$  (все величины, входящие в уравнение, выражены в единицах СИ).

$$1.296. T = 2\pi\sqrt{\frac{m(k_1 + k_2)}{k_1 k_2}}.$$

$$1.297. T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}.$$

$$1.298. T = \frac{2\pi}{r}\sqrt{\frac{I + mr^2}{2k}}, \text{ где } I = \frac{mr^2}{2}.$$

$$1.299. T = \pi\sqrt{\frac{ml}{F}} = 0,2 \text{ с.}$$

$$1.300. T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{S\rho g(1 + \cos\theta)}} = 0,8 \text{ с } (\rho - \text{плотность ртути}).$$

$$1.301. A = \frac{mg}{k}\sqrt{1 + \frac{2hk}{mg}}; E = mgh + \frac{m^2 g^2}{2k}.$$

$$1.302. T = 4\pi a \frac{\sqrt{ma^2}}{b^2}.$$

$$1.303. T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{4}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)}.$$

$$1.304. \text{ а) } \omega = \sqrt{\frac{k}{\mu}} = 6 \text{ рад/с; б) } E = \frac{1}{2}\mu v_0^2 = 48 \text{ Дж; } A = \frac{v_0}{\omega} = 2 \text{ м/с}^2, \text{ где}$$

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

$$1.305. \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{1 + \frac{2m_{\text{O}}}{m_{\text{C}}}} = 1,9, \text{ где } m_{\text{O}} \text{ и } m_{\text{C}} - \text{массы атомов кислорода и}$$

углерода.

$$1.306. t_2 = \frac{\ln \frac{A_0}{A_2}}{\ln \frac{A_0}{A_1}} t_1 = 21 \text{ с}; x = A_0 e^{-\alpha t} \cos 2\pi f t;$$

$$v = A_0 e^{-\alpha t} (-\alpha \cos 2\pi f t - 2\pi f \sin 2\pi f t), \text{ где } \alpha = \frac{\ln \frac{A_0}{A_1}}{t_1} = 0,11 \text{ с}^{-1};$$

$$\delta = \alpha T = \frac{\alpha \cdot 2\pi}{\sqrt{4\pi^2 f^2 - \alpha^2}} \approx \frac{\alpha}{f} = 2,2 \cdot 10^{-3}.$$

$$1.307. \delta = \alpha T = \frac{\alpha \cdot 2\pi}{\sqrt{g/l - \alpha^2}} \approx \alpha \cdot 2\pi \sqrt{l/g} = 0,014, \text{ где}$$

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\varphi_0}{\varphi_1}}{t}; \varphi = \varphi_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t, \text{ где } \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}; v = \varphi_0 l e^{-\alpha t} \omega \cos(\omega t + \pi/2);$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\varphi_0^2 l^2 e^{-2\alpha t}}{2} \omega^2 \cos^2(\omega t + \frac{\pi}{2}); E_p = mgl\varphi^2; Q = \frac{\pi}{\delta} = 224,3.$$

$$1.308. Q = \frac{\pi N}{\ln n} \approx 5 \cdot 10^2.$$

$$1.309. Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4g\tau^2}{l \ln^2 n} - 1} \approx 1,3 \cdot 10^2.$$

1.310. 1. Нет. 2. Да.

$$1.311. \Delta x = \frac{4F_{\text{тп}}}{k}, s = \frac{kx_0^2}{2F_{\text{тп}}}.$$

$$1.312. T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2,9 \text{ с}; N = \frac{x_0 - \Delta}{4\Delta} = 3,5 \text{ колебаний, где } \Delta = \frac{\mu mg}{k}.$$

$$1.320. v = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

$$1.321. f = \sqrt{f_1 f_2} = 245 \text{ Гц}.$$

$$1.322. f = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{2}} = 255 \text{ Гц}.$$

$$1.323. \alpha = \frac{\pi \Delta f}{\sqrt{3}} = 36 \text{ с}^{-1}, Q = \frac{\pi f}{\alpha} = 87.$$

$$1.324. r = \frac{F_0 T_0}{2\pi A_p} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.}$$

$$1.325. \frac{A_p}{A_{\omega \rightarrow 0}} = \frac{\left(1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}\right)\pi}{\delta} = 2,1.$$

$$1.326. Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\omega^2 \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 \text{tg}^2 \varphi}} - 1 = 0,35;$$

$$A = \pi m Y_m^2 (\omega^2 - \omega_0^2) \text{tg} \varphi = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж, где } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

$$1.327. \Delta \varphi = 3\varphi_0 \frac{h}{l}.$$

$$1.340. \approx 9,1 \text{ м.}$$

$$1.342. \text{ а) } \gamma = \frac{\ln \frac{r_0}{r}}{r - r_0} = 0,08 \text{ м}^{-1}; \text{ б) } v_m = \frac{2\pi \nu A_0}{n} = 0,15 \text{ м/с.}$$

$$1.343. \text{ а) } 50 \text{ дБ; б) } 300 \text{ м.}$$

$$1.344. P_{\text{ср}} = \pi R^2 (\Delta p_m)^2 / (2\rho \nu \lambda) = 1,1 \cdot 10^7 \text{ Вт; где } \rho - \text{ плотность воздуха.}$$

$$1.345. \text{ Уменьшится на } \frac{2u}{v+u} \cdot 100\% = 0,2\%.$$

$$1.346. u = \frac{v v_0}{v} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2} - 1 \right) \approx \frac{v v_0}{v_0} = 0,5 \text{ м/с.}$$

$$1.355. F = 2\pi r^2 p.$$

$$1.361. h = \frac{m}{\rho(S_1 + S_2)}.$$

1.362. Если при повороте параллелепипеда вокруг оси, проходящей через точку  $O$ , центр тяжести системы жидкость – параллелепипед вышается, положение параллелепипеда устойчиво. Это условие вы-

$$\text{полняется при } \frac{a}{b} > \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right)}.$$

$$1.364. 10,2 \text{ м.}$$

$$1.365. m = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho.$$

$$1.366. A = \pi r^2 \left( h + \frac{1}{2} l \frac{r^2}{R^2} \right) \rho g l.$$

$$1.367. \beta = \alpha - \arctg \mu.$$

$$1.368. p(x) = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \left[ (R-x)^2 - \frac{1}{4} R^2 \right].$$

$$1.369. m = \frac{\pi}{6} [d_1^3 (\rho_2 - \rho_1) + d_2^3 \rho_1].$$

$$1.371. F = \frac{1}{2} a^3 \rho g, \text{ где } \rho - \text{плотность воды; } h = \frac{1}{3} a.$$

1.372.  $a = 0,5g$ , если вектор ускорения направлен к удаленному днищу;  $a = 5g$ , если вектор  $\vec{a}$  имеет противоположное направление.

$$1.375. 5l.$$

$$1.376. h = \frac{a^2}{2S^2 g}.$$

$$1.377. v_1 = 28,3 \text{ м/с}, v_2 = 26,8 \text{ м/с}, v_3 = 25,3 \text{ м/с}; \text{ на двенадцатый этаж.}$$

$$1.378. F = 2S\rho\sqrt{2gh_0} \quad (\rho - \text{плотность воды}).$$

$$1.379. 1. v = \sqrt{\frac{2(p-p_0)}{\rho} + 2gh}, \text{ где } p_0 - \text{атмосферное давление.}$$

2. Пока уровень жидкости в сосуде выше нижнего конца трубки  $AB$ , скорость истечения постоянна и равна  $\sqrt{2gh}$ . После этого скорость истечения начнет уменьшаться.

1.380. На уровне нижнего конца трубки  $B$ . Выше нижнего конца трубки  $B$ .

$$1.381. h = \frac{p_0 - \frac{\rho v_1^2}{2} \left( \frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right)}{\rho g}.$$

$$1.382. v = \sqrt{2g(h-h_0)}.$$

$$1.384. 16,5 \text{ см/с}; 730 \text{ Па.}$$

$$1.385. 5,4 \cdot 10^{-6}. \text{ Предположение правильное; } 4,5 \text{ мм.}$$

$$1.386. \text{ а) } Q = \frac{1}{2} \pi v_0 R^2; \text{ б) } E_k = \frac{1}{6} \pi l R^2 \rho v_0^2; \text{ в) } F_{\text{тр}} = 4\pi \eta l v_0;$$

$$\text{г) } \Delta p = \frac{4\eta l v_0}{R^2}.$$

$$1.402. R = \frac{R_0}{2}.$$

$$1.403. 7,9 \text{ км/с.}$$

1.405. Орбита должна лежать в экваториальной плоскости;

$$R = \sqrt[3]{\frac{GM_3}{\omega^2}} = 6,61 R_3, \text{ где } \omega - \text{угловая скорость вращения Земли.}$$

$$1.406. \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}; \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{3/2}.$$

$$1.408. v_k \sim \frac{1}{\sqrt{R}}, \text{ где } R - \text{радиус планеты.}$$

$$1.410. F = \frac{4}{3}\pi GmR, \text{ где } R - \text{расстояние до центра шара;}$$

$$m\ddot{R} = -\frac{4}{3}\pi Gm\rho R, \text{ где } \rho - \text{плотность вещества шара.}$$

$$1.416. F = \frac{Gm_1m_2}{a(a+l)}.$$

1.417. Шары притягиваются, если  $\rho_1 > \rho_0$  и  $\rho_2 > \rho_0$  или  $\rho_1 < \rho_0$  и  $\rho_2 < \rho_0$ . Шары отталкиваются, если  $\rho_1 > \rho_0 > \rho_2$  или  $\rho_1 < \rho_0 < \rho_2$ .

$$1.418. L = m\sqrt{\frac{2GM_C r_1 r_2}{r_1 + r_2}}, \text{ где } M_C - \text{масса Солнца.}$$

$$1.419. K = \frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_C}{4\pi^2} \text{ (} M_C - \text{масса Солнца).}$$

$$1.420. T = \pi\sqrt{\frac{(r_1 + r_2)^3}{2M_C G}}, \text{ где } M_C - \text{масса Солнца.}$$

$$1.421. E = E_k + E_p = -\frac{GmM_C}{2a}, \text{ где } M_C - \text{масса Солнца.}$$

$$1.422. r_{\min} = \frac{GM_C}{v_0^2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{lv_0^2}{GM_C}\right)^2} - 1 \right), \text{ где } M_C - \text{масса Солнца.}$$

$$1.423. \sigma = \pi R_3^2 \left( 1 + \frac{v_2^2}{v_0^2} \right), \text{ где } v_2 - \text{вторая космическая скорость.}$$

1.424. Радиус орбиты уменьшится на 2%; скорость увеличится на 1%; период обращения уменьшится на 3%.

1.425.  $r_{\min} = 1,25 R_3, r_{\max} = 2,1 R_3.$

1.426. По гиперболической орбите.

1.427. Оба осколка будут двигаться по параболам. Наименьшее расстояние, на которое может приблизиться к Солнцу осколок,  $\frac{R}{2}.$

1.428.  $t = \frac{3 GM_C}{5 R_C P} \approx 5,9 \cdot 10^{14} \text{ с} \approx 1,9 \cdot 10^7 \text{ лет.}$

1.429.  $p = \frac{\rho g}{2R}(R^2 - r^2); p_{\text{ц}} = \frac{1}{2} \rho g R,$  где  $r$  – расстояние до центра Земли,  $R$  – радиус Земли,  $\rho$  – плотность вещества. Если бы земной шар состоял из несжимаемой воды, то  $p_{\text{ц}} = 3,2 \cdot 10^{10}$  Па. С учетом средней плотности вещества Земли ( $\rho = 5,5 \text{ г/см}^3$ )  $p_{\text{ц}} = 1,75 \cdot 10^{11}$  Па.

1.430.  $v_2 = \frac{v_1 r_1}{r_2} = 54,6 \text{ км/с.}$

## 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

2.8.  $F_{\text{гп}} / F_{\text{эл}} = 2,4 \cdot 10^{-43}; m / m_e = 2,04 \cdot 10^{21}.$

2.9.  $2,53 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2.$

2.11.  $0,0763 \text{ мм.}$

2.12.  $F = \frac{4\pi r e^2 r^2 N_A^2}{g M^2 \epsilon_0 R^2} = 4,37 \cdot 10^{12} \text{ Н}$  ( $N_A$  – постоянная Авогадро,  $M$  – молярная масса).

2.13.  $E = 5,12 \cdot 10^{11} \text{ В/м} \gg E_{\text{пр}}.$

2.14. Шарики соприкоснутся, а затем установятся на расстоянии  $0,15 \text{ см}$  друг от друга.

2.15.  $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3.$

2.16. На расстоянии  $l / \sqrt{2}$  от линии, соединяющей протоны.

2.17.  $Q = -\frac{2q}{(1 + \sqrt{2})^2}; r_1 = \frac{l}{1 + \sqrt{2}},$  где  $r_1$  – расстояние от заряда  $q$ ; равновесие неустойчиво.

2.18.  $-9,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл};$  равновесие неустойчиво.

2.19.  $Q = -q \frac{\sqrt{3}}{3}.$

$$2.20. E_A = \frac{el}{2\pi\epsilon_0 d^3} = 4,16 \cdot 10^6 \text{ В/м}; E_B = \frac{E_A}{2}.$$

$$2.21. M = qlE \sin \alpha = 9,36 \cdot 10^{-26} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$2.22. M = \frac{q_0 ql}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}; F = \frac{2q_0 ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = 1,8 \text{ Н}.$$

$$2.23. \text{На диполь } A: -\frac{p^2}{r^3}; \text{ на диполь } B: -\frac{2p^2}{r^3}.$$

2.24. Плоскость окружности перпендикулярна оси диполя. Скорость меняется от нуля до бесконечности.

$$2.31. 5,91 \cdot 10^5 \text{ Кл}.$$

$$2.33. E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \text{ при } r \leq R; E = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2} \text{ при } r \geq R.$$

$$2.35. \text{Внутри слоя } E = \frac{\rho x}{\epsilon_0}, \text{ ось } X \text{ направлена перпендикулярно к}$$

поверхности слоя,  $x = 0$  в середине слоя. Вне слоя  $E = \pm \frac{\rho d}{2\epsilon_0}$ .

$$2.36. q = \frac{2\epsilon_0}{\sigma} mg \operatorname{tg} \alpha = 3,34 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}.$$

$$2.37. \text{Внутри цилиндра } E = 0, \text{ вне } - E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon_0}.$$

$$2.38. E = 0; E = \frac{qd}{8\pi^2\epsilon_0 R^3}.$$

2.39.  $E = \frac{qh}{4\pi\epsilon_0 (h^2 + R^2)^{3/2}}; h_m = \pm \frac{R}{\sqrt{2}}$  ( $h_m$  – расстояние от точки, в которой  $E = E_m$ , до центра кольца).

$$2.40. E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 h^2} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{R^2}{h^2}\right)^{3/2}} - 1 \right]; \text{ при } \frac{R^2}{h^2} \ll 1 E = \frac{3qR^2}{8\pi\epsilon_0 h^4}.$$

$$2.41. 81 q_0.$$

$$2.42. E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{h^2}}} \right); \text{ а) при } \frac{R^2}{h^2} \gg 1 \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \text{ поле бесконеч-$$

ной плоскости; б) при  $\frac{R^2}{h^2} \ll 1 \quad E = \frac{\sigma R^2}{4\epsilon_0 h^2} - \text{ поле точечного заряда}$

$$q = \sigma \pi R^2.$$

$$2.43. E = \frac{\sigma}{4\epsilon_0}.$$

2.44.  $\vec{E}_0 = \frac{\rho \vec{a}}{3\epsilon_0}$ ; где  $\vec{a} = \vec{R} - \vec{r}$ . Вектор  $\vec{E}_0$  параллелен линии, соединяющей центры шара и полости; поле в полости однородно.

$$2.45. E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{h^2}}}.$$

$$2.46. E = \frac{\gamma l}{4\pi\epsilon_0 h \sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}}}; \text{ при } h \ll l \quad E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon_0 h} - \text{ поле бесконечно}$$

длинного цилиндра, при  $h \gg l \quad E = \frac{\gamma l}{4\pi\epsilon_0 h^2} - \text{ поле точечного заряда}$

$$q = \gamma l.$$

$$2.47. E = \frac{\gamma l}{4\pi\epsilon_0 h \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}}; \text{ } r \gg l \quad E = \frac{\gamma l}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \text{ поле точечного заряда}$$

$$q = \gamma l.$$

$$2.48. E = \frac{\gamma a}{2\pi\epsilon_0 r^2} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ В/м.}$$

$$2.49. F = \frac{\gamma g}{2\pi\epsilon_0 l \sin \alpha} \ln \left| \frac{x_0 + \frac{l}{2} \sin \alpha}{x_0 - \frac{l}{2} \sin \alpha} \right|; \text{ при } \alpha = 0^\circ \quad F = \frac{\gamma g}{2\pi\epsilon_0 x_0};$$

при  $\alpha = 90^\circ$   $F = \frac{\gamma g}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \left| \frac{x_0 + \frac{l}{2}}{x_0 - \frac{l}{2}} \right|$ .

2.50.  $F = \frac{qE}{2}$ .

2.51.  $F = 0$ ;  $F = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} dS$ .

2.52. При  $q_1 > 0$   $A = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r}$ ; при  $q_1 < 0$   $A = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r}$ .

2.53. Не зависит.

2.57. Да, потенциальным является любое центральное поле.

2.58. Равна нулю.

2.59.  $-0,27$  Дж.

2.60.  $2,5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Нулю.

2.61. а)  $E = \frac{(q_1 + |q_2|)^2 (|q_2| - q_1)}{4\pi\epsilon_0 l^2 q_1 |q_2|} = 3,75 \cdot 10^6$  В/м;

б)  $\varphi = \frac{\sqrt{q_1 |q_2|} (|q_2| - q_1) (\sqrt{q_1} - \sqrt{|q_2|})^2}{4\pi\epsilon_0 l (\sqrt{q_1 |q_2|} - q_1) (|q_2| - \sqrt{q_1 |q_2|})} = 1,8 \cdot 10^4$  В.

2.63.  $9 \cdot 10^{-5}$  Дж.

2.64.  $\vec{E} = \frac{3(\vec{p}, \vec{r})\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^5} - \frac{\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$ ;  $\varphi = \frac{(\vec{p}, \vec{r})}{4\pi\epsilon_0 r^3}$ .

2.65.  $E = 0$  при  $x = 1,36$  м от заряда  $q$  и  $2,36$  м от заряда  $-3q$ ;  
 $\varphi = 0$  при 1)  $x = 0,5$  м от заряда  $q$  и  $1,56$  м от заряда  $-3q$ ; при  
 2)  $x = 0,25$  м от заряда  $q$  и  $0,75$  м от заряда  $-3q$ .

2.66. При  $E = 0$   $\varphi = \text{const}$ , но не обязательно нуль.

2.67. Нельзя, дополнительно надо знать закон изменения напряженности вдоль нормали к эквипотенциальным поверхностям и местоположение точки с нулевым потенциалом.

2.68. Нет.

2.69. Нет.

2.71. Можно, на разность потенциалов это не повлияет.

2.72. 40 электронов.

2.73. 8,85 мм.

2.75. Нельзя.

2.76.  $q_1 = 10^{-4}$  Кл;  $q_2 = 10^{-7}$  Кл.

$$2.77. \sigma = \frac{2\varepsilon_0 A}{qd} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

$$2.78. \text{ а) } \gamma = \frac{2\pi\varepsilon_0 \Delta\varphi}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = 2,08 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}; \text{ б) } \sigma_1 = \frac{\gamma}{2\pi R_1} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2;$$

$$\sigma_2 = \frac{\gamma}{2\pi R_2} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2; \text{ в) } E_1 = \frac{\Delta\varphi}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 1,25 \cdot 10^4 \text{ В/м};$$

$$E_2 = \frac{2\Delta\varphi}{(R_2 + R_1) \ln \frac{R_2}{R_1}} = 5,75 \cdot 10^3 \text{ В/м}; E_3 = \frac{\Delta\varphi}{R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 3,74 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

$$2.79. A = \frac{q\gamma}{4\pi\varepsilon_0} \ln \frac{4}{3} = 1,5 \text{ Дж}.$$

$$2.80. \gamma = \frac{2\pi\varepsilon_0 A}{q \ln \frac{r_1}{r_2}} = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}.$$

$$2.81. \Delta\varphi \approx \frac{\gamma}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{r}{R} = 9,9 \cdot 10^5 \text{ В}.$$

$$2.82. \varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \sqrt{R^2 + h^2}}; E = \frac{qh}{4\pi\varepsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}}.$$

$$2.83. \varphi = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 R^2} \left( \sqrt{R^2 + h^2} - h \right); E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 R^2} \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}} \right).$$

$$2.84. \Delta E_k = \frac{eU}{2}; \Delta E_k = 0.$$

$$2.89. E_k = 13,6 \text{ эВ}; E_p = -27,2 \text{ эВ}; E = -13,6 \text{ эВ}.$$

$$2.90. 5,9 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$2.91. 1,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

$$2.92. 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

$$2.93. 38 \text{ В}; 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

$$2.94. 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}.$$

$$2.95. 80 \text{ В}.$$

$$2.96. 100 \text{ В}.$$

$$2.97. v - v_0 = \frac{1}{2} \frac{U^2 e^2 l^2}{m^2 a^2 v_0^3} = 5,6 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

$$2.98. U = 2U_0 \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

$$2.99. v = \sqrt{\frac{e\gamma \ln \frac{R}{r}}{\pi\epsilon_0 m}}.$$

$$2.100. E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 a} (q_1 q_2 + q_1 q_3 + q_2 q_3); E_{p1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 a} (q_1 q_2 + q_1 q_3).$$

$$2.101. \text{а) } \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a} (4 + \sqrt{2}); \text{б) } \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a} (\sqrt{2} - 4); \text{в) } -\frac{q^2 \sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0 a}.$$

$$2.102. -\frac{7e^2}{32\pi\epsilon_0 a}.$$

2.103.  $b = \frac{a}{2}(1 + \sqrt{5})$ , где  $a$  – расстояние между электронами,  $b$  – расстояние между протоном и ближайшим электроном.

$$2.104. v_{\max} = \frac{1,2e}{\sqrt{m_p \pi\epsilon_0 a}}.$$

$$2.105. A = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}.$$

$$2.107. W_s = \frac{3}{5} \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

$$2.108. r_0 = \frac{3}{20} \frac{e^2}{\pi\epsilon_0 m c^2}.$$

$$2.109. \Delta W_s = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3}{5} \sqrt[3]{\frac{4\pi\rho Q^5}{3}} \left(\frac{\sqrt[3]{2}}{2} - 1\right) = 6,69 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 418 \text{ МэВ}.$$

$$2.123. 2,08 \cdot 10^9; \text{ на } 1,89 \cdot 10^{-21} \text{ кг}.$$

$$2.125. q_2 = -q_1 \frac{R_2}{R_1}.$$

$$2.126. \varphi = \varphi_1 \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right).$$

$$2.127. E = 0, \text{ если } 0 < r < R_1; E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{r_1 r_3 - r_2}{r_2 r_3 - r_1}, \text{ если } R_1 < r < R_2;$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{r_3 r_2 - r_1}{r_2 r_3 - r_1}, \text{ если } R_2 < r < R_3;$$

$$E = 0, \text{ если } r > R_3.$$

$$2.128. \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d}; \text{ если шар заземлить, то } \varphi' = 0, q' = q \frac{r}{d}.$$

$$2.129. \varphi = \frac{Q - q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

$$2.130. \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{q_1 + q_2}{2S}; \sigma'_1 = \sigma'_2 = \frac{q_1 - q_2}{2S}; E_1 = \frac{q_1 - q_2}{2S\epsilon_0}; E_2 = \frac{q_1 + q_2}{2S\epsilon_0},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – поверхностные плотности заряда на внешних сторонах пластин, а  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_2$  – на внутренних;  $E_1$  и  $E_2$  – напряженности поля между пластинами и за пластинами, соответственно.

$$2.131. F = q \frac{E_1 + E_2}{2}, \text{ сила направлена вправо.}$$

$$2.132. E_1 = \frac{1}{3} \frac{\sigma}{\epsilon_0}, E_2 = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

$$2.133. F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{8R^2} = 5 \cdot 10^2 \text{ Н.}$$

2.134. Увеличится.

$$2.135. F = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 a^2}; Q = 0; \sigma_A = -\frac{q \cos^3 \theta}{2\pi a^2}, \text{ где } \theta \text{ – угол между нор-}$$

малью к пластине и радиусом-вектором, проведенным от заряда в рассматриваемую точку на пластине.

$$2.136. F = \frac{q_1^2 - q_2^2}{\pi\epsilon_0 (d_1 - d_2)^2} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Н.}$$

$$2.137. F = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{26 - 2\sqrt{5}}}{5l^2}.$$

$$2.138. E = \frac{2gh}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{(h^2 + s^2)^3}} = 1,14 \cdot 10^4 \text{ В/м.}$$

$$2.139. F = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{a^4 + b^4}}{a^2 b^2}.$$

$$2.140. \text{ а) } F = \frac{\gamma^2}{4\pi\epsilon_0 l}; \text{ б) } \sigma = \frac{l\gamma}{\pi(l^2 + x^2)}.$$

$$2.142. E_k = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right).$$

2.145. а) Не изменится; б) увеличится.

2.146. а)  $E$ ; б)  $E/\epsilon$ .

$$2.149. \sigma_1 = \frac{\epsilon-1}{\epsilon} \frac{Q}{16\pi R^2}; \sigma_2 = \frac{\epsilon-1}{\epsilon} \frac{Q}{36\pi R^2}; Q_1 = Q_2 = \frac{\epsilon-1}{\epsilon} Q.$$

$$2.150. \sigma_{\text{св}} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2.$$

$$2.151. \sigma_{\text{св}} = \sigma \frac{\epsilon-1}{\epsilon}; P = \frac{\epsilon+1}{\epsilon} \sigma.$$

$$2.152. F = \frac{\epsilon_0 \epsilon^2 U^2 S}{2(\epsilon l_1 + l_2)^2}.$$

$$2.153. \text{ а) } 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}; \text{ б) } 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

$$2.154. F_1 = \frac{q^2}{2S\epsilon_0} = 0,075 \text{ Н} - \text{ сила, действующая на пластину, находящуюся в воздухе};$$

$$F_2 = \frac{q^2}{2\epsilon^2 \epsilon_0 S} = 8,37 \cdot 10^{-3} \text{ Н} - \text{ сила, действующая на}$$

$$\text{пластину, находящуюся в диэлектрике}; F_3 = \frac{q^2}{2S\epsilon_0} \frac{\epsilon^2 - 1}{\epsilon^2} = 0,067 \text{ Н} - \text{ си}$$

ла, действующая на поверхность жидкости.

$$2.155. \text{ а) } 78^\circ 46'; \text{ б) } 1,31 \cdot 10^4 \text{ В/м}; \text{ в) } 1,13 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2.$$

$$2.156. \sigma_{\text{max}} = (\epsilon - 1)\epsilon_0 E = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2.$$

$$2.157. \text{ а) } \sigma_{\text{св}} = \frac{q}{2\pi h^2} \frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} = 10^{-6} \text{ Кл/м}^2; \sigma'_{\text{св}} = \frac{q}{2\pi d^3} \frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} = 2,16 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2;$$

$$\text{ б) } q_{\text{св}} = q \frac{\epsilon-1}{\epsilon+1}; \text{ в) } F = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 h^2} \frac{\epsilon-1}{\epsilon+1}.$$

$$2.159. h = \frac{\epsilon_0(\epsilon-1)U^2}{\rho g(R^2 - r^2) \ln \frac{R}{r}}.$$

$$2.166. C = 4\pi\epsilon_0 R = 7,08 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}.$$

$$2.167. C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}(\epsilon-1)}.$$

$$2.168. q = 4\pi\varepsilon_0(\varepsilon + 1)R\varphi = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл.}$$

$$2.169. \varphi = \frac{q_1 + q_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 168 \text{ В}; q = \frac{q_1 R_1 + q_2 R_2}{R_1 + R_2} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ Кл.}$$

$$2.170. R_2 = R_1 \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_2} = 0,3 \text{ м.}$$

$$2.171. q = \pm \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0 S F} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$$

$$2.173. A = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d} (\varepsilon - 1) = 2,79 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

$$2.174. \text{ а) } A = \frac{C U^2}{2}; \text{ б) } A = -\frac{C U^2}{4}.$$

$$2.175. C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 D^2}{4d} \left( \frac{2\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

$$2.176. A = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2 d_1}{2d(d - d_1)} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ Дж.}$$

$$2.177. U = \frac{3q}{2C}.$$

$$2.178. C = \frac{2\pi\varepsilon_0 d_1 d_2}{d_2 - d_1} = 8,35 \cdot 10^{-15} \text{ Ф.}$$

$$2.179. C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}}; E = \frac{U}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 1,55 \cdot 10^6 \text{ В/м.}$$

$$2.180. \text{ а) } \frac{\varepsilon_0 S}{2d} (1 + \varepsilon); \text{ б) } \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 S}{d(1 + \varepsilon)}; \text{ в) } 2 \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

$$2.181. C = \frac{\varepsilon_0 S \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} = 5,16 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

2.182. а)  $C_{\text{общ}} = 3C$ ; б)  $C_{\text{общ}} = C$ , где  $C$  – емкость одного конденсатора.

$$2.183. \text{ а) } U_1 = 750 \text{ В}, U_2 = 450 \text{ В}; \text{ б) } q = 225 \text{ нКл.}$$

$$2.184. C_3 = 4 \text{ мкФ}; W_1 = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}; W_2 = 10^{-2} \text{ Дж}; W_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

$$2.185. \text{ а) } 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}; \text{ б) } < 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}; \text{ в) } 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

$$2.186. C_x = \frac{C}{2}.$$

$$2.187. C_{\text{общ}} = \frac{C\sqrt{5}-1}{2} = 0,62C.$$

$$2.188. C = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{b}{a}}.$$

$$2.189. C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2b}{a}\right)}.$$

$$2.190. C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon a.$$

$$2.191. C = 4\pi\varepsilon_0 a.$$

$$2.197. I = \frac{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon-1)rUv}{d} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ A}.$$

$$2.198. j_1 = 3,8 \text{ A/M}^2; j_2 = 1,9 \cdot 10^3 \text{ A/M}^2.$$

$$2.199. t = enlS/I; t = 13,3 \text{ ч}.$$

$$2.200. 57,3 \text{ Ом}.$$

$$2.201. R = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \frac{r_2}{r_1} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \text{ (}\rho \text{ – удельное сопротивление алю-}$$

миния).

$$2.202. R = \frac{\rho(b-a)}{4\pi ab}; \text{ при } b \rightarrow \infty R = \frac{\rho}{4\pi a}.$$

$$2.203. R = \frac{\rho}{2\pi d} = 160 \text{ Ом}.$$

$$2.204. R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{b}{a}.$$

$$2.205. R = \frac{\rho h}{\pi R_1 R_2}.$$

$$2.206. 44 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2.207. Угольный стержень должен быть в 44 раза короче.

$$2.208. \alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1} = 1,125 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

$$2.210. \rho = \frac{\tau}{\varepsilon\varepsilon_0 \ln \frac{q_0}{q}} = 1,47 \cdot 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

$$2.211. j = \frac{\varepsilon_0}{\rho r \ln \frac{R_2}{R_1}} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon\varepsilon_0 \rho}}.$$

$$2.212. q = q_0 e^{-\frac{\gamma t}{\varepsilon \varepsilon_0}}; \tau = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \ln 2}{\gamma}; j = \frac{\gamma q_0}{8\pi \varepsilon \varepsilon_0 a^2}.$$

$$2.213. \tau = \ln 10 \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\gamma}; j = 0,1 \frac{\gamma q_0}{S \varepsilon \varepsilon_0}.$$

$$2.214. \text{а) } j_1 = 132,5 \text{ A/m}^2; \text{б) } j_2 = 56 \text{ A/m}^2, I = 4,1 \text{ A}.$$

$$2.215. \text{а) } j = \frac{2alU}{\rho r^3}; \text{б) } R = \frac{\rho}{4\pi a}.$$

$$2.221. R_x = R \frac{(U_0 - U_2)U_1}{(U_0 - U_1)U_2} = 78 \text{ 600 Ом}.$$

$$2.222. 2 \text{ В}; 3,2 \text{ В}.$$

$$2.223. 0,47 \text{ А}.$$

$$2.224. 4,1 \text{ В}; 0,05 \text{ Ом}.$$

$$2.225. \Delta\varphi_{AB} = 3,7 \text{ В}; \Delta\varphi_{BC} = 0,6 \text{ В}; \Delta\varphi_{AC} = 4,3 \text{ В}.$$

$$2.226. 0,1 \text{ Ом}.$$

$$2.227. \Delta\varphi_{AB} = \Delta\varphi_{BC} = 1,25 \text{ В}.$$

2.228. Нуль; нуль; через четное число элементов  $\Delta\varphi = \mathcal{E}_1 (\mathcal{E}_1 - \text{ЭДС}$  одного элемента), через нечетное –  $\Delta\varphi = 0$ .

$$2.229. \mathcal{E}_2/r_2 < \mathcal{E}_1/(r_1+R).$$

$$2.230. R = r_2 - r_1; \Delta\varphi = 0 \text{ на клеммах источника с сопротивлением } r_2.$$

$$2.231. t = \frac{4\pi\varepsilon_0\Delta\varphi r}{I} \approx 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

$$2.232. R = \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_2 - U_1}{I_1} = 25,6 \text{ Ом}.$$

$$2.234. U_1 = U \frac{rxl}{Rxl + rl^2 - Rx^2}; \text{а) } U_1 = 0; \text{б) } U_1 = U;$$

$$\text{в) } U_1 = U \frac{2r}{R+4r} < \frac{U}{2}; \text{г) } U_1 \sim x.$$

$$2.236. I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 r_2 + (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)R}{r_1 r_2 + Rr_1 + Rr_2}, I_2 = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 + (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1)R}{r_1 r_2 + Rr_1 + Rr_2},$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 + \mathcal{E}_1 r_2}{r_1 r_2 + Rr_1 + Rr_2}; \text{б) } r_{\text{эКВ}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \mathcal{E}_{\text{эКВ}} = \frac{\mathcal{E}_1 \lambda_1 + \mathcal{E}_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \text{ где } \lambda_1 = \frac{1}{r_1},$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{r_2}; \text{ если } \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2, \text{ то } \mathcal{E}_{\text{эКВ}} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2; \text{ если } r_1 = r_2, \text{ то } \mathcal{E}_{\text{эКВ}} = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{2};$$

$$в) I_{кз,1} = \frac{\mathcal{E}_1}{r_1}; I_{кз,2} = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}.$$

$$2.237. \frac{1}{3} \text{ А}; \frac{2}{3} \text{ А}; 1 \text{ А}.$$

$$2.238. I > \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{r_2} = 40 \text{ А}.$$

$$2.239. R = 1,4r.$$

$$2.240. R = \frac{5}{11}r.$$

$$2.241. а) \frac{5}{6}r; б) \frac{7}{12}r; в) 0,8r; г) r; д) \frac{r}{2}.$$

$$2.242. а) R = R_1 \frac{(a+b)\sqrt{a^2+b^2}}{a+b+2\sqrt{a^2+b^2}}; б) R = R_1 \frac{2ab+(a+b)\sqrt{a^2+b^2}}{a+b+2\sqrt{a^2+b^2}}.$$

$$2.253. I_2 = 2\sqrt{2}I_1.$$

2.254. Нагревательная спираль делится на две равные части (секции), секции соединяются параллельно.

$$2.257. 121 \text{ Ом}.$$

$$2.258. I_1 = 0,1 \text{ А}; I_1 = 0,2 \text{ А}.$$

$$2.259. а) I_1 = 2\frac{2}{3} \text{ А}, I_2 = 2 \text{ А}; б) P_{\max} = \frac{n \mathcal{E}^2}{4r} = 8\frac{1}{6} \text{ Вт}.$$

$$2.260. \text{Параллельно}; P = 2,46 \text{ Вт}.$$

$$2.261. P_{\max} = 18 \text{ Вт}.$$

$$2.262. A = 2480 \text{ Дж}.$$

$$2.263. а) 2 \text{ Дж}, 2 \text{ Дж}; б) 2 \text{ Дж}, 0,7 \text{ Дж}; в) 2 \text{ Дж}, 0,6 \text{ Дж}.$$

$$2.264. A = 2 \text{ Дж}.$$

$$2.266. \tau = RC \ln 2 = 6,93 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad \Delta W = \frac{3}{8}CU^2 = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$Q = \frac{1}{8}CU^2 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

$$2.267. Q = \frac{CR_1 \mathcal{E}^2}{2(R_1 + R_2)} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}.$$

$$2.268. 1,5 \text{ Ом} \text{ или } 0,75 \text{ Ом}.$$

$$2.269. n = 3.$$

$$2.270. а) R_1 R_2 = r^2; б) R_1 R_2 > r^2.$$

$$2.271. R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 120 \text{ Ом.}$$

$$2.272. R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; P_{\max} = \frac{(\xi_1 R_2 + \xi_2 R_1)^2}{4R_1 R_2 (R_1 + R_2)}.$$

$$2.273. I_2 = I_1 \sqrt{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3} \approx 23 \text{ А.}$$

2.274. Вследствие одинаковости температур накала волосков площади боковых поверхностей волосков должны быть пропорциональны соответствующей мощности. Отсюда следует, что

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\left(\frac{P_2 U_1}{P_1 U_2}\right)^2} = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ м}; l_2 = l_1 \sqrt[3]{\frac{P_2 U_2^2}{P_1 U_1^2}} = 0,614 \text{ м.}$$

$$2.275. 4 \text{ В}; 0,55 \text{ А.}$$

$$2.284. Z = 3.$$

$$2.285. \text{ а) } 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг}; \text{ б) } 3,01 \cdot 10^6 \text{ Кл/кг.}$$

$$2.286. 0,7 \text{ В.}$$

$$2.292. 0,14 \text{ А.}$$

$$2.293. 9,1 \cdot 10^{-5}.$$

$$2.294. A = \frac{k T_1 T_2 \ln \left[ \frac{I_1 T_2^2}{I_2 T_1^2} \right]}{T_1 - T_2}, \text{ где } k - \text{ постоянная Больцмана, } T_1 \text{ и}$$

$T_2$  – температуры по шкале Кельвина,  $A = 4,665 \text{ эВ.}$

$$2.295. 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \approx 100 \text{ раз.}$$

$$2.296. \text{ Над океаном } n = 790 \text{ см}^{-3}; \text{ над сушей } n = 800 \text{ см}^{-3}.$$

$$2.297. \text{ а) } t = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1}{\Delta n} - \frac{1}{\Delta n_0} \right) = 62 \text{ с}; \text{ б) } t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n} = 460 \text{ с.}$$

$$2.298. 4,78 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2.$$

$$2.299. \Delta n = \frac{I}{e S d} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$2.300. n = \frac{I}{e S l} = 6,25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$2.301. \Delta n = 1,25 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}; \Delta n_0 = 2,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}.$$

$$2.302. I = n S l e = 4 \cdot 10^{-16} \text{ А.}$$

$$2.303. t = \frac{U \epsilon_0}{e n d^2} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ с} = 15 \text{ сут.}$$

2.313. Увеличится в 4 раза.

2.314. а) 18,6 А/м; б) 23,8 А/м.

2.315. а)  $B = \frac{\mu_0 I}{2R} = 6,3 \cdot 10^{-6}$  Тл; б)  $B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} = 2,3 \cdot 10^{-3}$  Тл.

2.316.  $H = 0$ .

2.317.  $H = \frac{3I}{2\pi a}$ .

2.318.  $H = 0$ .

2.319.  $H = 0$ .

2.320.  $H = \frac{IN}{2\pi l} (\cos \beta - \cos \alpha)$ .

2.321. а)  $H = \frac{I}{2\pi R}$ ; б)  $H = \frac{IN}{2\pi r}$ ; в)  $H = nI$ .

2.322.  $B = \frac{\mu_0 I}{\pi d} = 8 \cdot 10^{-3}$  Тл.

2.323.  $I = \frac{2\pi RH}{1 + \pi} = 12,1$  А.

2.324. Ошибка в показаниях компаса составляет 19%.

2.325.  $B = \frac{2\mu_0 I}{\pi a} = 8 \cdot 10^{-5}$  Тл.

2.326. а)  $H_1 = \frac{I r_1}{2\pi R^2} = 100$  А/м;  $H_2 = \frac{I}{2\pi r_2} = 159$  А/м;

б)  $\Phi = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  Вб.

2.327.  $\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{R}{r} = 3,13 \cdot 10^{-4}$  Вб.

2.328. При  $r < R_1$   $H = 0$ ; при  $R_1 \leq r \leq R_2$   $H(r) = \frac{I(r^2 - R_1^2)}{(R_2^2 - R_1^2) 2\pi r}$ ; при

$r < R_2$   $H = \frac{I}{2\pi r}$ .

2.329.  $B = \frac{2\rho g S \operatorname{tg} \alpha}{I} = 9,35 \cdot 10^{-3}$  Тл, где  $\rho$  – плотность меди.

2.330.  $B_{\min} = \frac{\mu m g}{I l} = 0,055$  Тл.

2.331.  $H = \frac{jd}{2}$ ; поле в полости однородно.

2.332.  $R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \eta$ .

2.333.  $\frac{dB}{dx} = 3,27 \text{ Тл/м}$ .

2.338.  $3,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ;  $5,9 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$ ;  $5,235 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ;  $10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ .

2.339.  $\frac{m_1}{m_2} = 4$ .

2.341.  $t = \frac{2Wm_p}{e^2UB}$ .

2.342.  $v = \frac{E}{B} = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ;  $\vec{v} \perp \vec{E}$ ,  $\vec{v} \perp \vec{B}$ .

2.343.  $\alpha = \arcsin \left( Bd \sqrt{\frac{e}{2m_p U}} \right) = 30^\circ$ .

2.346.  $L = \frac{m^2 v^2}{eB}$ ;  $p_m = \frac{m v^2}{2B}$ .

2.347.  $\Delta\omega = \frac{eB}{2m}$ ;  $\vec{\Delta p} \downarrow \downarrow \vec{B}$ .

2.348.  $B = \frac{\mathcal{E}}{Rec} \approx 3 \text{ Тл}$ .

2.351.  $3 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ .

2.352.  $l_0 = \frac{\sqrt{4\pi IL}}{\mu_0} = 100 \text{ м}$ .

2.353. а)  $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{2\pi R}$ , где  $R$  – средний радиус тора;

б)  $L_l = \frac{\mu \mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$ ; в)  $L_l \rightarrow \infty$ .

2.354.  $L_l = \frac{\mu \mu_0}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{d}{r} \right) = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

2.355. а) Индуктивность близка к нулю; б) 0,2 Гн; в) 0,05 Гн.

2.356.  $L_{\text{общ}} = 2L$ ; б)  $L_{\text{общ}} = L/2$ .

2.357.  $M = 0,6 \text{ Гн.}$

2.358.  $\Phi = \frac{\mu \mu_0 N I a}{2\pi} \ln \frac{D}{D-2a} = 3,57 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$

2.359.  $\Phi = \frac{\mu \mu_0 N I a^2}{\pi D + (\mu - 1)l} = 2,43 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$

2.360.  $\mu = 1 + \frac{\pi D (\Phi_1 - \Phi_2)}{\Phi_2 d_2 - \Phi_1 d_1} = 315.$

2.361.  $\mu = \frac{k B (l - l_1)}{\mu_0 N I k - B l_1} \approx 1400.$

2.362.  $I_2 = 11 \text{ А.}$

2.364.  $0,182 \text{ Дж.}$

2.365.  $\text{В } 1550 \text{ раз.}$

2.382.  $n = \frac{\mu_0 H S R}{2 \rho e} \text{ (}\rho \text{ – удельное сопротивление меди).}$

2.383.  $v = \frac{2 \rho I_m}{\pi B a S} = 1 \text{ Гц (}\rho \text{ – удельное сопротивление меди).}$

2.384.  $q = \frac{\Delta \Phi - L \Delta I}{R} = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$

2.385.  $I = \frac{n D S}{4 \rho} \frac{dI}{dt} = 0,2 \text{ А (}\rho \text{ – удельное сопротивление меди).}$

2.387. а)  $U = \frac{B \omega l^2}{2} = 337,5 \text{ В; б) } U = 0; \text{ в) } U = \frac{B \omega l^2}{4} = 168,75 \text{ В.}$

2.388.  $I = \frac{\mathcal{E} - v B l}{R}.$

2.389.  $q = \frac{\mu_0 I a}{2 \pi R} \ln \frac{r_0 + a/2}{r_0 - a/2}.$

2.390.  $\mathcal{E} = \frac{\mu_0 I a b v}{2 \pi (l + a) b}.$

2.391.  $\tau = \frac{L \ln 2}{R} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$

2.392. Увеличится на  $0,8^\circ \text{C.}$

2.393.  $U_{AB} = U \frac{R_1}{R} e^{-\frac{R+R_1}{L} \tau} \approx 490 \text{ В.}$

2.401.  $I = 0,25 \text{ А; } I_{\text{ср}} = 0,125 \text{ А.}$

$$2.402. \text{ а) } U_{\text{cp}} = 0; U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}; \text{ б) } U_{\text{cp}} = \frac{U_0}{\pi}, U = \frac{U_0}{2};$$

$$\text{в) } U_{\text{cp}} = \frac{2U_0}{\pi}, U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

$$2.403. U_{\text{cp}} = \frac{U_0}{2}, U = \frac{U_0}{\sqrt{3}}.$$

$$2.404. t = \frac{q\pi}{2I\sqrt{2}} = 5,4 \cdot 10^4 \text{ с.}$$

$$2.405. 57 \text{ В}; 0,385.$$

$$2.406. \text{ а) } I_1 = 0,84 \text{ А}, I_2 = 0,89 \text{ А}; \text{ б) } Q = 634 \text{ Дж.}$$

$$2.407. I_0 = \frac{Bmf}{2D\rho}; I_{\text{cp}} = \frac{Bmf}{2\sqrt{2}D\rho}, \text{ где } D - \text{ плотность материала кольца,}$$

$\rho$  – удельное сопротивление.

$$2.409. \approx 138 \text{ Ом.}$$

$$2.410. 25,5 \text{ мГн}; 53^\circ 10'.$$

$$2.411. P_1 = \frac{U_1^2}{R} = 97 \text{ Вт}; P_2 = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2R} = 105 \text{ Вт.}$$

$$2.412. 154 \text{ Вт}; 312,5 \text{ Вт.}$$

$$2.413. R = \frac{3R_2^2 - 5R_1^2}{2R_1 - R_2} = 137,5 \text{ Ом}; L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{16R_1^2 - (R_1 + R)^2} = 1,16 \text{ Гн,}$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления первой и второй ламп.

$$2.414. 54,4 \text{ Ом}; 100 \text{ мкФ.}$$

$$2.415. \text{ а) } 41^\circ 39'; \text{ б) } 86^\circ 47'.$$

$$2.416. 2,5.$$

$$2.417. C = 9,7 \text{ мкФ.}$$

$$2.418. 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

$$2.419. 100 \text{ мкФ}; 25 \text{ В.}$$

$$2.420. 2,8 \text{ Гн.}$$

$$2.421. L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{U^2 R}{P} - R^2} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}; Z = U \sqrt{\frac{R}{P}} = 20 \text{ Ом.}$$

$$2.422. 0,8.$$

$$2.423. \text{ При } R = \omega L - r = 200 \text{ Ом}; P_{\text{max}} = \frac{U^2}{2\omega L} = 110 \text{ Вт.}$$

$$2.424. 18,4 \text{ Ом}; 65 \text{ мкФ.}$$

2.425. 1936 ВТ, 101 мкФ.

$$2.426. P = \frac{\mathcal{E}_0^2 R}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}; C = \frac{1}{\omega^2 L}; P_{\max} = \frac{\mathcal{E}_0^2}{R}.$$

2.427. 2,75 Вт.

2.428. 200 Ом.

$$2.429. m = \frac{\rho D l^2 P}{0,08 U_0^2} = 46354 \text{ кг, где } D - \text{плотность меди, } \rho - \text{ее удельное}$$

сопротивление.

2.430. 80 Ом.

2.431. 420 Вт.

2.432.  $D = 2,1$  мм.

2.439. От 0,16 до 0,46 МГц.

2.440. Не изменится.

2.441. а)  $T = 8 \cdot 10^3$  с; б)  $\delta = 0,69$ ; в)  $u = 80e^{-87t} \cos 250\pi t$  (в единицах СИ).

2.442. а) Нет; б) да.

$$2.443. \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\sqrt{4Q^2 - 1}}{2Q}.$$

$$2.444. N_1 = \frac{1}{\delta}; N_2 = \frac{1}{2\delta}.$$

$$2.445. \text{а) } W_0 = \frac{L + CR_1^2}{2(R_1 + R_2)^2} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж; б) } 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

2.446.  $1,84 \cdot 10^{-4}$  Вт.

$$2.447. P = \frac{U_m^2 CR}{2L} = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

$$2.448. \sigma = \frac{2\pi P}{U_m^2} \sqrt{\frac{L}{C}} = 2,12 \cdot 10^{-2}.$$

$$2.449. \delta = \frac{\pi \Delta C}{C_0 \sqrt{n^2 - 1}} = 0,028.$$

$$2.454. \Delta\lambda = \frac{c}{v} \left( \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} - 1 \right) = -42 \text{ см.}$$

$$2.455. \frac{j_{\text{нр}}}{j_{\text{см}}} = \frac{\rho}{2\pi f \epsilon \epsilon_0} = 2.$$

2.456.  $\mathcal{E}(t) = 0,026 \sin(6,3 \cdot 10^6 t - kx)$  (в единицах СИ).

$$2.457. W = \frac{E_0^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \tau S = 2,2 \cdot 10^{-9} \text{ Дж.}$$

$$2.458. \frac{I_0}{I_{0\max}} = 0,96; \frac{U_0}{U_{0\max}} = 0,26.$$

$$2.459. Z_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon \epsilon_0}} \ln \frac{2D}{d} \approx 180 \text{ Ом.}$$

2.460.  $T_k = \frac{2l\sqrt{\epsilon}}{2(k+1)c}$ , где  $k$  – номер гармоники,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость воды ( $\epsilon \approx 80$ ),  $c$  – скорость света в вакууме.

### 3. ОПТИКА

3.6.  $E_0 \approx 1,03 \cdot 10^3 \text{ В/м; } H_0 \approx 2,73 \text{ А/м.}$

3.7. 275 мкм.

3.8. 0,5 мкм.

3.10.  $\approx 4,57 \cdot 10^{-3} \text{ Вт; } \approx 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт.}$

3.11.  $40 \pi \text{ лм} \approx 125,7 \text{ лм.}$

3.12. В 2 раза.

3.13.  $E_0 \approx 5,49 \cdot 10^{-5} \text{ В/м; } H_0 \approx 1,46 \cdot 10^{-7} \text{ А/м.}$

3.14. Может.

3.15. 10 м.

3.16.  $\approx 1,34\%$ .

3.17. 15,3 лк.

$$3.18. E_1 = \frac{I}{h^2} \left[ 1 + \frac{R}{\sqrt{2}(\sqrt{2}+1)^2} \right]; E_2 = \frac{I}{4h^2} (\sqrt{2} + R).$$

$$3.19. h = \frac{l}{\sqrt{2}}.$$

3.20.  $I_\varphi = I_0 / \cos^3 \varphi.$

3.21.  $E = E_0 h^2 D^2 \approx 156,25 \text{ лк.}$

3.22.  $2,25 \cdot 10^{27} \text{ Кд.}$

3.23. 6 с.

3.24. 46 с.

$$3.25. E = \frac{\Phi}{2\pi al} = 690 \text{ лк.}$$

$$3.26. P = \frac{4\pi Eh^2}{\eta \cos \alpha} = 39 \text{ Вт.}$$

3.28. Если светящаяся поверхность плоская, то  $I = I_0 \cos \varphi$ , если сферическая, то сила света не зависит от направления.

$$3.29. M = \pi L.$$

3.31. Яркость Луны не изменится; освещенность, создаваемая ею на поверхности Земли, увеличится в 4 раза.

$$3.32. \alpha = \frac{L_{\text{л}} R_{\text{лс}}^2}{L_{\text{с}} R_{\text{с}}^2} = 0,076, \text{ где } R_{\text{с}} - \text{радиус Солнца, } R_{\text{лс}} - \text{расстояние}$$

между Луной и Солнцем.

$$3.33. \approx 11,8\%.$$

$$3.34. E_{\text{с}} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ лк, } E_{\text{л}} \approx 0,2 \text{ лк.}$$

$$3.35. \alpha_1 = \text{arctg}(R_2 / R_1); \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1.$$

$$3.36. 5,3 \cdot 10^6 \text{ лм/м}^2.$$

$$3.37. 133 \text{ лм/м}^2; 36 \text{ кд/м}^2.$$

$$3.38. \text{ а) } 1,27 \text{ лк; б) } 0,72 \text{ лк.}$$

3.39. Нельзя.

3.40. Нет.

$$3.41. \tau_{\text{к}} = \frac{1}{\Delta \nu}; l_{\text{к}} = \frac{c}{\Delta \nu}; \Delta \varphi = 2\pi.$$

$$3.42. \approx 3 \text{ м.}$$

$$3.43. \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ с; } \approx 4 \text{ см.}$$

3.59.  $\approx 6,33 \text{ мм}$ ; максимум нулевого порядка находится в центре интерференционной картины, максимумы первого и второго порядков, соответственно, на расстоянии  $6,33$  и  $12,66 \text{ мм}$  от него.

$$3.60. h = \frac{5\lambda}{n-1} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$3.61. h_{\text{max}} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda (n-1)} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

$$3.62. l \geq 0,8 \text{ м.}$$

3.63.  $d < \frac{\lambda_{\text{min}}}{2\alpha}$  ( $\lambda_{\text{min}}$  – минимальная длина волны в спектре белого света);  $d < 20 \text{ мкм}$ .

$$3.64. 2. 1,1 \text{ мм. 3. Меньше } 24 \text{ мкм. 4. 18 \text{ полос.}}$$

3.65. 0,55 мм.

3.66.  $\delta = \pi - \frac{(L+d)\lambda}{xd(n-1)}$ ;  $\delta = 179,5^\circ$ .

3.67.  $h = \frac{L\lambda}{2x} = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м.

3.68.  $b \approx \frac{l\lambda}{2d} = 7,5 \cdot 10^{-4}$  м.

3.69.  $n_1 = n + N\lambda / l = 1,000377$ .

3.70.  $\approx 4$  см; 63 280.

3.71.  $n = 1 + \frac{dx}{Lh} = 1,52$ ;  $\Delta n = \frac{d}{Lh} \Delta x \approx 6,7 \cdot 10^{-3}$ .

3.72.  $n' = n + \frac{N\lambda}{2l} = 1,000572$ .

3.73.  $m_{\min} = \frac{1}{2} \lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_1) = 140$ .

3.74.  $\Delta h = \frac{\lambda \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} = 3 \cdot 10^{-4}$  мм.

3.85. а)  $\theta = 3'$ ; б)  $\Delta\lambda / \lambda = 0,14$ .

3.86.  $\theta \approx 17''$ .

3.87. 23 ПОЛОСЫ.

3.88. 1,19 мкм.

3.89.  $d = \frac{\lambda l}{2x} \approx 10^{-5}$  м.

3.90.  $h = \frac{\lambda d}{2x} = 1,1 \cdot 10^{-5}$  м.

3.92.  $\approx 0,588$  мкм;  $\approx 3,47$  мкм.

3.93. 998-е кольцо, соответствующее меньшей длине волны.

3.94. 491-е кольцо; для 983-го кольца.

3.95.  $r = \sqrt{r_0^2 - 2R\Delta h} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м.

3.96.  $r = \sqrt{r_0^2 + \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda R} = 3,8 \cdot 10^{-3}$  м, где  $m = 6$ .

3.97. 10,2 см.

3.98. 17,7 см.

3.99.  $\approx 1,9$  мм.

$$3.100. r_m = \sqrt{\frac{m\lambda}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}}$$

3.101. При удалении линзы от пластинки кольца будут стягиваться к центру, при приближении – расширяться от центра.

$$3.103. d = 104 \text{ к нм, где } k = 1, 2, 3, \dots$$

$$3.104. d = \frac{1}{4} \lambda (1 + 2k) / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 1,4 \cdot 10^{-7} (1 + 2k) \text{ м, где } k = 0, 1, 2, \dots$$

$$3.105. 0,65 \text{ мкм.}$$

3.106. Темной.

$$3.107. \approx 0,5 \text{ мкм.}$$

$$3.108. d = \frac{1}{4n} \lambda (1 + 2k), k = 0, 1, 2, \dots$$

$$3.109. d_{\min} = \frac{1}{4n} \lambda \approx 0,1 \text{ мкм.}$$

$$3.118. \approx 4E_0; E_0; \frac{9}{4} E_0.$$

$$3.119. \approx E_0.$$

3.120. Число зон, открываемых отверстием,  $m = \frac{d^2 l}{4\lambda a(l-a)} \approx 3$ , значит, освещенность экрана больше, чем при отсутствии ширмы.

$$3.121. \lambda = \frac{d^2(a+b)}{4ab} = 6,25 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$3.122. \Delta b = \frac{8b_1^2 \lambda}{D^2 - 8b_1 \lambda} = 0,15 \text{ м.}$$

$$3.123. \lambda = (r_2^2 - r_1^2)(a+b) / (2ab) = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$3.124. r_m = \sqrt{m\lambda b}; r_1 = 2,12 \text{ мм.}$$

$$3.125. b_m = \frac{d^2}{4m\lambda}, m = 2k+1, k = 1, 2, 3, \dots; b_1 = 0,5 \text{ м, } b_2 \approx 0,167 \text{ м;}$$

$$b_3 \approx 0,1 \text{ м.}$$

$$3.126. b = \frac{r^2 a}{a\lambda - r^2} \approx 0,28 \text{ м.}$$

$$3.127. \text{ а) } 2,5 I_0; \text{ б) } 8 I_0.$$

$$3.128. r_m = \sqrt{m\lambda f b / (b-f)} = 2,17 \cdot 10^{-2} \sqrt{m} \text{ м, } m = 1, 2, 3, \dots$$

3.129. На расстоянии 1,2 м от пластинки.

3.130.  $f = 90$  см;  $r_1 = 0,672$  мм; фокусное расстояние увеличится.

$$3.131. f_k = \frac{f_0}{2k+1}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

3.132.  $b_k = \frac{af_k}{a-f_k}$ , где  $f_k = \frac{ab}{(a+b)(2k+1)}$  – фокусные расстояния зон-

ной пластинки.

3.133.  $\approx 0,4$  м.

$$3.135. m = \frac{r^2}{a\lambda}.$$

3.136. Минимальное число зон Френеля, открываемое отверстием,  $m = \frac{r^2}{a\lambda} = 4$ . Так как  $m > 1$ , дифракцию Фраунгофера в этих условиях наблюдать нельзя. Минимальное значение  $a$ , при котором это возможно, равно 2 м.

3.144.  $\varphi_1 = 17^\circ 8'$ ,  $\varphi_2 = 36^\circ 5'$ ,  $\varphi_3 = 62^\circ$ .

3.145. 5 см.

3.146.  $\varphi = 30^\circ$ .

3.147.  $b(\cos\alpha - \cos\alpha_0) = m\lambda$ ,  $\alpha$  – угол скольжения, соответствующий минимуму,  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$

3.148. Квадрат со стороной 3,5 см.

3.149. Около 60 км.

$$3.150. r \approx \sqrt{0,61l\lambda}.$$

$$3.151. r_{\text{онт}} \leq \sqrt{l\lambda_{\text{зел}}}.$$

3.152. Первый случай осуществляется, если отверстие открывает не больше одной зоны Френеля, т.е.  $D \leq \sqrt{4l\lambda}$ ; второй – если отверстие открывает много зон Френеля, т.е.  $D \gg \sqrt{4l\lambda}$  ( $\lambda = 555$  нм).

3.157. 546 нм.

3.158. а)  $6'53''$ ; б)  $55'08''$ .

3.159. 479,6 нм.

$$3.160. n = \frac{l}{f(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad n = 400 \text{ штрихов/мм.}$$

3.161. Не могут.

3.162. 5.

3.163.  $m = nd/b, n = 1, 2, 3, \dots$

3.164. Исчезнут: 1) спектры порядков 2, 4, 6,...; 2) спектры порядков 3, 6, 9,...; 3) спектры порядков 4, 8, 12,...

3.165. Максимальный порядок равен наибольшему из целых чисел, не превосходящих  $d/\lambda$ .

3.166.  $\lambda = 648,1$  нм.

3.167.  $d = 3,9 \cdot 10^{-3}$  мм.

3.168.  $\sin \varphi_1 = \frac{2\lambda_1}{d} \approx \frac{3\lambda_2}{d} \approx 0,267$ ,  $\varphi_1 \approx 15^\circ 30'$ , или

$\sin \varphi_2 = \frac{4\lambda_1}{d} \approx \frac{6\lambda_2}{d} \approx 0,535$ ,  $\varphi_2 \approx 32^\circ 20'$ , или

$\sin \varphi_3 = \frac{6\lambda_1}{d} \approx \frac{9\lambda_2}{d} \approx 0,8035$ ,  $\varphi_3 \approx 53^\circ 27'$ .

3.169.  $\lambda_{\max} \approx d$ ;  $d > 0,01$  см ( $d$  – период решетки).

3.170.  $v = 2\lambda \nu / x = 3016$  м/с.

3.171.  $d(\sin \theta - \sin \theta_0) = m\lambda$ . Если  $d \gg m\lambda$ , то это условие имеет вид:  
 $d \cos \theta_0 (\theta - \theta_0) = m\lambda$ .

3.172. а) 3; б) 5.

3.173.  $\lambda \approx 0,057$  нм.

3.174.  $\approx 1$  мкм.

3.175. От 520 до 625 нм.

3.176.  $d = 6$  мкм;  $b = 1,5$  мкм;  $m = 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9$ .

3.181. 107,9 рад/нм; 25,57 рад/нм.

3.182. 5 мкм.

3.183.  $8,08 \cdot 10^{-2}$  мм/нм.

3.184. а)  $81''/\text{нм}$ ; б)  $0,197$  мм/нм; в)  $5,08$  нм/мм.

3.185.  $\approx 0,12$  мм.

3.186. 1000.

3.187. 2,2 мм.

3.188.  $\Delta \varphi \approx \frac{2\lambda}{Nd}$ .

3.189.  $\approx 2,95 \cdot 10^{-5}$  рад. Линии дублета натрия будут хорошо разрешаться.

3.190. Длину волны спектральной линии определяют по положению максимума интенсивности; ошибка измерения положения максимума может быть в несколько раз меньше, чем уширение спектральной линии, которое определяется разрешающей способностью решетки.

3.191.  $A = 2 \cdot 10^4$ ;  $A_{\max} = 6,79 \cdot 10^4$ .

3.192.  $\Delta \lambda = 0,05$  нм. Может, если проводить измерения в спектрах более высокого порядка.

$$3.198. \approx 986 \text{ км}; \tau = \frac{T}{12}; \tau \approx 8,75 \text{ мин.}$$

3.200. Полное затмение бывает, когда расстояние от центра Луны до поверхности Земли меньше 376 000 км; кольцеобразное – когда оно больше этого значения.

$$3.209. 75 \text{ см.}$$

3.210.  $x = 2r \sin \alpha = 10,6 \text{ см.}$  Сместится в противоположном направлении на расстояние  $y = l \cos \alpha = 1,7 \text{ см.}$

3.211. Испытав 9 отражений от зеркал, пучок выйдет из двугранного угла в направлении, совпадающем с направлением падающего пучка. Световой поток на выходе будет иметь значение, равное  $\approx 1,17 \text{ лм.}$

3.212. *A* и *B* увидят друг друга, когда *B* будет на расстоянии 0,5 м от зеркала.

3.214. Зеркало должно быть наклонено к горизонту под углом  $75^\circ 50'$ .

$$3.215. \beta_{1,2} = \left( \frac{\pi}{2} \pm \alpha \right) / 2; \beta_1 = 60^\circ, \beta_2 = 30^\circ.$$

$$3.216. 32 \text{ см.}$$

$$3.217. 2,5 \text{ см.}$$

$$3.218. H_{\min} = h \frac{s_2}{s_1 + s_2} = 36 \text{ см.}$$

$$3.219. s_{\min} = 2h / \sqrt{n^2 - 1} = 13,7 \text{ м.}$$

$$3.220. 56,8 \text{ лм.}$$

$$3.221. 1,32.$$

$$3.222. 1,29 \text{ м.}$$

$$3.223. \operatorname{tg} \alpha = n.$$

$$3.224. 48^\circ 19'$$

$$3.225. \approx 190 \text{ см}^2.$$

$$3.227. n = \sqrt{2} \approx 1,41.$$

$$3.228. \text{Точка кажется приближенной к глазу на расстояние } x = d \frac{n-1}{n},$$

где  $d$  – толщина пластины,  $n$  – показатель преломления.

$$3.229. l = \frac{d}{n} = 10 \text{ см.}$$

$$3.230. l_2 = l_1 + \frac{d}{n} = 18 \text{ см.}$$

$$3.232. n = \frac{d}{d - \Delta}.$$

3.233. 1,5.

3.234.  $81^\circ$ ;  $\sqrt{2} < n < 2$ .

3.235.  $16^\circ$ .

3.236. Уменьшится на  $21^\circ 51'$ .

3.237. Расстояние между лучами не меняется, длины лучей в призме одинаковы.

3.238.  $\varphi_{\min} = 38^\circ 56'$ ;  $\varphi_{\max} = 59^\circ 26'$ , наибольшее отклонение получается, когда луч выходит из призмы под углом, близким к  $\pi/2$ .

3.239. В шестиугольных призмах грани образуют между собой углы  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ . Гало с угловым радиусом  $22^\circ$  соответствует углу  $60^\circ$ , гало с угловым радиусом  $46^\circ$  – углу  $90^\circ$ .

3.261.  $\frac{a}{R} = 0,14$ .

3.262. 1,333.

3.263.  $f = \frac{R}{2n} = 22,5$  см ( $n$  – показатель преломления воды).

3.264. 23 мм.

3.265. а) –6 дптр; б) 1,5 дптр.

3.266. Для этого изображение, даваемое линзой, должно совпасть с оптическим центром зеркала.

3.267. 20 см.

3.268. Изображение действительное и увеличенное в два раза, когда объект находится на расстоянии 30 см от зеркала. Изображение мнимое и увеличенное в два раза, когда объект находится на расстоянии 10 см от зеркала.

3.269. 7,5 см.

3.270. Изображение окажется по другую сторону зеркала на расстоянии 40 см от его вершины.

3.271. Не может.

3.272. На 0,53 мм.

3.273. 9 см.

3.274.  $h = \sqrt{ab}$ .

3.275.  $l > \frac{100+p}{p} f$ .

3.276. Увеличение равно  $\frac{L+l}{L-l}$  или  $\frac{L-l}{L+l}$ .

3.277. а) 0,48 м; б) 2,65 м; в) 0,864 м.

3.278. Меньшее изображение ярче в  $\left(\frac{a+b}{a-b}\right)^2 = 2,25$  раза.

- 3.279. 80 и 19 см или 69 и 22 см.  
 3.280. а) 2500 и 12 500 лк; б) 5100 и 15 100 лк.  
 3.281. Увеличится приблизительно в 525 раз.  
 3.283.  $f_{кр} = 1,015$  м,  $f_{ж} = 1$  м,  $f_c = 0,982$  м.  
 3.284.  $D_{кр} = 0,74$  мм,  $D_c = 0,92$  мм.  
 3.300. 4 дптр.  
 3.301. 73 x 73 см; 12 см; 6,3 см.  
 3.302. Уменьшится в 1,44 раза.  
 3.303. 90 см.  
 3.304. 0,1125 м.  
 3.305. В первом случае диск радиусом около 5,2 мм; во втором случае – радиусом  $\approx 1,3$  см.  
 3.306. Фокус отодвинется от объектива на  $d \frac{n-1}{n} = 2$  мм.  
 3.307. 2,16 см.  
 3.309. а) 12,5; б) 7,5.  
 3.310. 12,5 см.  
 3.311. 10 см; 2,5.  
 3.312. 5.  
 3.313. На 5 мм.  
 3.314. 2,6 мм; 5 см; 250.  
 3.315. 60.  
 3.316. 18 см; 125.  
 3.317. Увеличить в 3,64 раза.  
 3.318. 564.  
 3.319. 1. Увеличение будет равно 0,4. 2. 12 дптр; – 30 дптр. 3. Оправа окуляра.  
 3.320.  $f'_1 = 36$  см;  $f'_2 = 4$  см,  $f_1 = 45$  см;  $f_2 = 5$  см.  
 3.321. Отношение освещенностей равно единице.  
 3.322.  $\Gamma' = (\Gamma + 1) \frac{n - n_0}{n_0(n - 1)} - 1 = 3,1$  ( $n_0$  – показатель преломления воды).  
 3.323. В  $\sqrt{\alpha\beta} = 10$  раз.  
 3.324. В  $\sqrt{\alpha\beta} = 10$  раз.  
 3.325. 47,7 мм;  $10^\circ 54'$ .  
 3.326. 58,4 см;  $8^\circ 36'$ .  
 3.327. 56;  $\approx 16$  мкм.  
 3.328.  $25''$ .  
 3.329. 4 см.  
 3.330. 9 км.

3.331. Нет.

3.332. 3 см.

3.333.  $\approx 1$  мкм.

3.335.  $\Gamma \geq \frac{D}{d}$ , где  $D$  – диаметр объектива,  $d$  – диаметр зрачка глаза.

3.336. а) 34,6"; б) 0,042 мм.

3.337.  $\varphi_{\min} \approx 2,6''$ ;  $\Gamma \geq \frac{D}{d}$ .

3.338.  $\varphi_{\min} = 0,023''$ .

3.340. Может обнаружить только присутствие.

3.341. На Луне 43 м, на Солнце около 17 км.

3.342. 62,6 км.

3.343.  $D \approx 2\sqrt{\lambda L} = 4,5 \cdot 10^{-4}$  м.

3.344.  $L \approx \frac{D^2}{4\lambda} = 4,5 \cdot 10^5$  м;  $S = \frac{D}{L} \approx 2,7 \cdot 10^{-7}$ .

3.345. 56 см.

3.346. 0,18";  $8,35 \cdot 10^7$  км; 24,7 мкм.

3.347.  $\approx 5,4$  мкм;  $\approx 0,023''$ .

3.355. а) 1,6; б) 1,272.

3.356.  $41^\circ 15'$ .

3.357.  $66^\circ 40'$ ;  $46^\circ 38'$ .

3.358. Луч 1 полностью поляризован, его интенсивность составляет  $0,1 I_0$ . После первого преломления получился луч 2, в котором  $0,8 I_0$  приходится на естественный свет и  $0,1 I_0$  на поляризованный. Луч 3 полностью поляризован, его интенсивность составляет  $0,08 I_0$ . Луч 4 частично поляризован, в нем  $0,18 I_0$  приходится на поляризованный свет,  $0,64 I_0$  на естественный; степень поляризации луча 4 – 22%.

3.359. В 12 раз; в 65 раз.

3.360.  $54^\circ 44'$ .

3.361. 1,73.

3.362. а) 1,63; б)  $66^\circ 56'$ .

3.363.  $67^\circ 23'$ .

3.364. Электрический вектор должен лежать в плоскости падения. Показатель преломления материала призмы должен быть равен  $n = 1/\operatorname{tg}(\theta/2) = 1,73$ .

3.365. а) 0,82; б) 0,044.

3.366. 0; 0,82, 1,0; 0.

3.367. 0,3.

3.368.  $R = 0,074; p = 0,08.$

3.369.  $p = 0,159.$

3.370.  $\frac{I_0}{I} = \frac{2}{0,81 \cos^2 \alpha} = 13,8.$

3.371.  $I_{\text{отр}} = \frac{1}{2} I_0 \cos^4 \alpha; I'_{\text{отр}} = I_0 \cos^6 \alpha.$

3.372.  $45^\circ.$

3.373.  $\alpha = 62^\circ 32'.$

3.394.  $d_{\text{min}} = 0,603 \text{ мм}; d_{\text{max}} = 0,673 \text{ мм}.$

3.395.  $\delta = 5^\circ 17'.$

3.396.  $5,16 \text{ мкм}.$

3.397.  $d = \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$

3.398. Свет будет поляризован по левому кругу.

3.399. Свет останется линейно поляризованным, но плоскость колебаний электрического вектора повернется на угол  $2\alpha$  и будет симметрична своему исходному положению относительно оси полуволновой пластинки.

3.400.  $\beta_1 = -\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} = -35^\circ, \beta_2 = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} = +55^\circ.$

3.401. Возможны два решения:

1)  $\beta = \frac{\alpha}{2}, I = \frac{I_0}{2} \cos^4 \frac{\alpha}{2};$

2)  $\beta = \frac{\alpha - \pi}{2}, I = \frac{I_0}{2} \sin^4 \frac{\alpha}{2}, \beta$  – угол, на который должен быть по-

вернут николю 3 относительно николя 1.

3.402.  $m = \frac{d(n_e - n_o)(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 \lambda_1} = 10.$

3.403.  $m = \frac{d_{\text{max}}(n_e - n_o)}{\lambda} = 10.$

3.404. Одновременно должны выполняться два условия:

$\frac{2\pi d}{\lambda_1} \Delta n = \pi m$  и  $\frac{2\pi d}{\lambda_2} \Delta n = 2\pi k.$  Минимальные значения целых чисел  $m$

и  $k$ , при которых это возможно, равны соответственно 7 и 4. Значит,

$d_{\text{min}} = \frac{7\lambda_1}{2\Delta n} = \frac{4\lambda_2}{\Delta n} \approx 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 251 \text{ мкм}.$

$$3.405. \Delta n = \frac{\lambda}{\theta x} = 0,009.$$

$$3.414. 1) u = a = v; 2) u = \frac{a\sqrt{\lambda}}{2} = \frac{v}{2}; 3) u = \frac{3a}{2\sqrt{\lambda}} = \frac{3v}{2}; 4) u = \frac{2a}{\lambda} = 2v;$$

$$5) u = \frac{c^2}{\sqrt{c^2 + a^2 \lambda^2}}.$$

$$3.416. 1,00171.$$

3.418. Условие  $N$ -го затемнения:  $\omega \frac{2D}{c} = \frac{N\pi}{Z}$ . Записав его для  $N$ -го и  $N+1$ -го затемнений, получим:  $c = 2DZ(\omega_{N+1} - \omega_N) = 3,0038 \cdot 10^8$  м/с.

$$3.419. v = 2,25 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad u = 2,217 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$3.424. \frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \ll \frac{v}{c} = 1,53 \cdot 10^{-4}.$$

$$3.425. 30 \text{ м/с}.$$

$$3.428. v = c \frac{(\lambda_1 / \lambda_2)^2 - 1}{(\lambda_1 / \lambda_2)^2 + 1} = 5,7 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

$$3.429. \Delta \lambda = 2,1 \text{ нм}.$$

$$3.430. 0,28 \text{ м}.$$

$$3.431. \Delta \lambda \approx 45 \text{ нм}.$$

3.432. Удаляется со скоростью 1385,7 км/с.

$$3.433. 0,11 \text{ нм}.$$

$$3.434. \Delta \lambda = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ нм}.$$

$$3.435. v = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 3,22 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

$$3.436. T_1 \approx 1,82 \cdot 10^6 \text{ с } (\approx 21 \text{ сут}); T_2 \approx 2,18 \cdot 10^6 \text{ с } (\approx 25 \text{ сут}).$$

#### 4. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

$$4.12. 1,2 \cdot 10^{21} \text{ фотонов}.$$

$$4.13. N = \frac{J\lambda}{hc} = 3,7 \cdot 10^{21} \text{ фотонов/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

$$4.14. 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

$$4.24. t = \frac{16I^2 A}{Pd^2} = 481 \text{ с } (A - \text{ работа выхода электрона из цезия}).$$

4.25. б)  $A = 1,8 \text{ эВ}$ .

4.26.  $\lambda \leq 10^{-12} \text{ м}$ .

4.27.  $A = \frac{hc(n^2 / \lambda_2 - 1 / \lambda_1)}{n^2 - 1}$ ;  $A = 1,9 \text{ эВ}$ .

4.28.  $1,7 \text{ В}$ .

4.29.  $N = \gamma \frac{I_H}{e} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ .

4.30.  $W_{k \max} = \hbar(\omega + \omega_0) - A$ , где  $A$  – работа выхода;  $W_{k \max} = 0,38 \text{ эВ}$ .

4.31.  $0,196 \text{ мкм}$ ;  $0,213 \text{ мкм}$ ;  $0,224 \text{ мкм}$ .

4.32.  $\lambda_0 = \Delta\lambda \frac{n}{n-1} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ;  $U_0 = \frac{hc}{e\lambda_0} = 2,07 \cdot 10^4 \text{ В}$ .

4.33.  $v = c\sqrt{\alpha / (\alpha + 2)} / (\alpha + 1) = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ , где  $\alpha = \frac{h}{mc\lambda_{\min}}$ .

4.34.  $31 \text{ кВ}$ .

4.35. а)  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ ; б)  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,1$ .

4.36.  $\varphi = \frac{2GM}{Rc^2} \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ .

4.38. а)  $F = \frac{2IS}{c} \cos^2 \alpha$ ; б)  $F = \pi R^2 \frac{I}{c}$ ; в)  $F = \frac{5 IS}{3 c}$ .

4.39.  $2,75 \cdot 10^{-14} \text{ Н}$ .

4.40.  $P_{\text{ср}} = 4E(1 + R) / (\pi d^2 c \tau) = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

4.41.  $\lambda = \frac{h}{mc} (\sqrt{1 + 2mc^2 / E_{k \max}} - 1) = 2 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ .

4.42.  $5,46 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

4.43.  $0,25 \text{ МэВ}$ .

4.44.  $\cos \varphi_{\max} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2 c^4}}$ .

4.45. а)  $\lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ ; б)  $E_k = 0,511 \text{ МэВ}$ .

4.46.  $0,05 \text{ МэВ}$ .

4.47.  $10,2\%$

4.48.  $1150 \text{ К}$ .

4.60.  $1,6 \cdot 10^3 \text{ Па}$ .

4.61.  $T = T_{\text{с}} \sqrt{R_{\text{с}} / R_{\text{зс}}} = 395 \text{ К}$ , где  $R_{\text{с}}$  – радиус Солнца,  $R_{\text{зс}}$  – расстояние от Земли до Солнца.

$$4.62. t = \frac{\rho dc}{12\sigma\alpha} \left[ \frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right] = 2,8 \text{ с, где } \rho \text{ и } c - \text{плотность и удельная те-}$$

плоемкость вольфрама.

$$4.63. T_p = T(\alpha_T)^{1/4} < T.$$

$$4.64. \text{ а) } T = \frac{b}{\lambda_m} = 5800 \text{ К; б) } P = 4\pi R_c^2 \sigma T^4 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт;}$$

$$\text{в) } \Delta m = Pt / c^2 = 4,33 \cdot 10^9 \text{ кг; г) } \tau = 1,45 \cdot 10^{11} \text{ лет.}$$

$$4.66. 1. 278 \text{ К. 2. 250 К.}$$

$$4.67. T_M = 203 \text{ К; } T_{Ю} = 105 \text{ К.}$$

$$4.68. P = \frac{2\pi k T v^2 \Delta v}{c^2} \frac{R^2}{R_{3C}^2} = 2,1 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2.$$

$$4.69. \frac{I_k}{I_0} = \frac{2n(m_p + m_e)v^3}{\alpha^2 \sigma T^4} = 7 \cdot 10^{-8}.$$

$$4.70. \varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^{hc/(\lambda k T)} - 1}.$$

$$4.71. \text{ а) } B \text{ 4,76 раза; б) } 6 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

$$4.72. \text{ а) } \varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} e^{-h\nu/(kT)}; \text{ б) } \varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi k T \nu^2}{c^2}.$$

4.85. В спектре рекомбинации присутствуют все спектральные линии, а за коротковолновой границей каждой серии наблюдается непрерывный спектр.

$$4.87. \omega = \frac{e}{r} \sqrt{1 / (4\pi \varepsilon_0 m r)} = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

$$4.88. 5,9 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

$$4.89. 5 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

$$4.90. 2,5 \cdot 10^{74}.$$

4.92.	H	He <sup>+</sup>	Li <sup>2+</sup>
а)	$r_1 = 5,29 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$	$r_1 = 2,645 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$	$r_1 = 1,763 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$
	$r_2 = 0,2116 \text{ нм}$	$r_2 = 0,1058 \text{ нм}$	$r_2 = 7,05 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$
	$v_1 = 2,19 \cdot 10^6 \text{ м/с}$	$v_1 = 4,38 \cdot 10^6 \text{ м/с}$	$v_1 = 6,67 \cdot 10^6 \text{ м/с}$
	$v_2 = 1,095 \cdot 10^6 \text{ м/с}$	$v_2 = 2,19 \cdot 10^6 \text{ м/с}$	$v_2 = 3,285 \cdot 10^6 \text{ м/с}$
б)	$5,15 \cdot 10^{11} \text{ В/м}$	$1,03 \cdot 10^{12} \text{ В/м}$	$1,545 \cdot 10^{12} \text{ В/м}$
в)	$E_k = E_{св} = 13,6 \text{ эВ}$	$E_k = E_{св} = 54,4 \text{ эВ}$	$E_k = E_{св} = 122,4 \text{ эВ}$

г)  $10,2 \text{ В}$ ;  $1,215 \cdot 10^{-7} \text{ м}$   $40,8 \text{ В}$ ;  $3,04 \cdot 10^{-8} \text{ м}$   $91,8 \text{ В}$ ;  $1,35 \cdot 10^{-8} \text{ м}$

д) Магнитный момент электрона на первой боровской орбите во всех трех случаях одинаков и равен одному магнетону Бора ( $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$ ); отношение магнитного момента к механическому также одинаково и равно

$$\frac{e}{2m} = 8,79 \cdot 10^{10} \text{ Кл/кг.}$$

- 4.93. Серия Лаймана:  $\lambda = 9,1 \cdot 10^{-8} \dots 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  
серия Бальмера:  $\lambda = 3,67 \cdot 10^{-7} \dots 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  
серия Пашена:  $\lambda = 8,2 \cdot 10^{-7} \dots 1,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  
серия Брэккета:  $\lambda = 1,46 \cdot 10^{-6} \dots 4,047 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  
серия Пфунда:  $\lambda = 2,27 \cdot 10^{-6} \dots 7,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

4.94. 3400.

4.95.  $\lambda_1 = 1,214 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $\lambda_2 = 1,024 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $\lambda_3 = 6,556 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

4.96.  $6,25 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ .

4.97.  $v_1 = 3,25 \text{ м/с}$ ;  $\frac{\Delta E}{E} = 5,5 \cdot 10^{-7} \%$ ;  $v_2 = 1,65 \text{ м/с}$ .

4.98. Не может.

4.99. 540,5 нм; 1014 нм; 1161 нм.

4.100. 79 эВ.

4.101. а)  $R_\infty = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ ; б)  $R = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{M_{\text{я}}}}$ .

4.102.  $M_r = \frac{m/m_0}{\lambda_2/\lambda_1 + m/m_p - 1} = 2$ , где  $m$  – масса электрона, кг;  $m_p$  – масса протона, кг;  $m_0$  – атомная единица массы, кг.

4.103.  $r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar (1 + m_\mu / m_p)}{e^2 m_\mu} = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ ;  $N = \frac{\tau e^4 m_\mu}{2\pi \hbar^3 (4\pi\epsilon_0)^2 (1 + m_\mu / m_p)} = 70$ .

4.104. а)  $1,06 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ; б) 6,8 эВ, 5,1 В; в)  $5,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , 0,243 мкм.

4.106.  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$  (постоянная тонкой структуры).

4.107.  $r_n = \frac{\hbar n^2}{\alpha m c}$ ,  $E_n = \frac{\alpha^2 m c^2}{2n^2}$ ,  $v_n = \frac{\alpha}{n} c$ .

4.111.  $68^\circ 36'$

4.118. а)  $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE_k}} \frac{1}{\sqrt{1+E_k/(2mc^2)}}$ ; б) для электронов  $E_k \leq 20$  кэВ,

для протонов  $E_k \leq 37,67$  МэВ.

4.119.  $v_{гp} = v$ ;  $v_{\phi} = c^2/v$ .

4.120.  $U_0 = \frac{\hbar^2}{(\sqrt{n}-1)^2 \cdot 8d^2 m e \sin^2 \theta} = 150$  В.

4.121. 0,212 МэВ.

4.122. 400 эВ;  $6,1 \cdot 10^{-11}$  м.

4.123.  $\lambda' = \lambda \sqrt{(n+1)/(n-1)} = 2,2 \cdot 10^{-12}$  м.

4.124.  $\tau = n^2 \pi l^2 / (2\hbar) \approx 10^{-12}$  с.

4.125. 14 К; 0,335 нм.

4.126.  $d \geq \frac{\hbar}{2A \sqrt{2meU[1+eU/(2mc^2)]}} = 1,2 \cdot 10^{-11}$  м.

4.133.  $\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{c\Delta t} \approx 10^{-13}$  м;  $\Delta\lambda/\lambda = \frac{\lambda}{c\Delta t} \approx 10^{-7}$  м.

4.134.  $E_{\min} \approx 200$  МэВ; электрон не может находиться в ядре атома.

4.135. а)  $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}$ ; б)  $\Psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l}$ ;

в)  $P = 1/3 + \sqrt{3}/(2\pi) = 0,61$ ; г)  $dN_E = \frac{l}{\pi\hbar} \sqrt{m/(2E)} dE$ .

4.136. 1.  $R = \left( \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^2$ ,  $D = 1 - R = \frac{4k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2}$ , где  $k_1 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE}$ ,

$k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E-U_0)}$ . 2.  $R = 1$ .

4.137.  $D = \frac{16E}{U_0} \left( 1 - \frac{E}{U_0} \right) \exp(-2l\sqrt{2m(U_0-E)/\hbar^2})$ .

4.138.  $\sim \exp(-10^8)$ .

4.146. 0,2 эВ (Na); 6,7 эВ (Cs).

4.148.  $2,3 \cdot 10^5$ .

4.155. -0,41 для S-терма и -0,04 для P-терма.

4.156.  $E_{cs} = \hbar R / (\sqrt{R\lambda_1\lambda_2 / (2\pi c\Delta\lambda)} - 1)^2 = 5,3$  эВ.

4.157. 1,22 нм (Na).

4.158. 15 кВ.

4.159.  $U = E_H \frac{(Z-1)^2}{e} = 6582 \text{ В}$ , где  $E_H$  – энергия ионизации атома

водорода.

4.160.  $E_1 = 1,129 \text{ кэВ}$ ;  $E_2 = 1,38 \text{ кэВ}$ .

4.163.  $\tau = \frac{Nkv}{P} \frac{g_2}{g_1} e^{-hv/(kT)} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , где  $g_1$  и  $g_2$  – кратности вырождения

уровней  $2s$  и  $2p$ .

4.164.  $2 \cdot 10^{-5} \text{ нм}$ .

4.165. При  $v < \frac{kT}{h} \ln 2 = 4,3 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$ .

4.168.  $N_1(t) = \frac{qA_{21}}{A_{10}A_{20}} \left( 1 - \frac{A_{20}e^{-A_{10}t} - A_{10}e^{-A_{20}t}}{A_{20} - A_{10}} \right)$ .

4.169. Решение. Из принципа детального равновесия  $A_{21}N_2 + B_{21}uN_2 = B_{12}uN_1$  выразим  $u$ :  $u = \frac{A_{21}}{B_{12}N_1 / N_2 - B_{21}}$ . Учитывая, что

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} e^{(E_2-E_1)/(kT)}, \text{ и } E_2 - E_1 = hv, \text{ получим } u(v, T) = \frac{A_{21}}{\frac{g_1}{g_2} B_{12} e^{hv/(kT)} - B_{21}}.$$

При  $T \rightarrow \infty$   $u(v, T) \rightarrow \infty$ , поэтому  $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$ . Кроме того, из сравнения с формулой Планка для объемной плотности энергии излучения:

$$u(v, T) = \frac{8\pi hv^3}{c^3} \frac{1}{e^{hv/(kT)} - 1} \text{ следует, что } B_{21} = \frac{c^3}{8\pi hv^3} A_{21}.$$

4.170. Решение. Из принципа детального равновесия (см. решение задачи 4.169) имеем:  $\frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{вын}}} = \frac{A_{21}N_2}{B_{21}uN_2} = \frac{B_{12}N_1}{B_{21}N_2} - 1$ . Учитывая, что

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} e^{(E_2-E_1)/(kT)}, \quad g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \text{ и разность энергий уровней } 2p \text{ и } 2s$$

атома водорода  $E_2 - E_1 = \frac{3}{4} hcR$  ( $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга), получим искомое отношение вероятностей:

$$\frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{вын}}} = e^{(3hcR)/(4kT)} =$$

$$= 10^{34}; \quad P_{\text{сп}} = P_{\text{вын}} \text{ при } T = (3hcR)/(4k \ln 2) = 1,7 \cdot 10^5 \text{ К}.$$

4.173.  $\varphi = 2,44\lambda / d = 8,08 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$  (2,78°).

4.177.  $\rho_m = 1,5 \cdot 10^{27} \text{ кг/м}^3$ ;  $n = 8,7 \cdot 10^{43} \text{ м}^{-3}$ ;  $\rho_q = 7 \cdot 10^{24} \text{ Кл/м}^3$ .

4.182. а) 6,76 и 7,34 МэВ; б) 14,4 МэВ.

4.183. 6,73 МэВ.

4.184. 7,16 МэВ.

4.186.  $r_1 \approx r_2 = 4,1$  фм.

4.187.  $\tau = 5 \cdot 10^{-21}$  с.

4.188. 1,2%.

4.190.  $\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2} = 2,33 \cdot 10^{-35}$  кг, где  $E_{\text{св}}$  – энергия связи электрона с

ядром.

4.191.  $Z > 1460$ .

4.203.  $P = 1 - e^{-\lambda t}$ .

4.205.  $9 \cdot 10^{-7}$ .

4.206.  $10^{10}$  Бк.

4.207.  $1,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

4.208. 6 л.

4.209. 3471 год.

4.210.  $t \approx 1,65 \cdot 10^9$  лет.

4.211. 16,08%; 83,92%.

4.212. С момента образования Земли за время  $t = 4 \cdot 10^9$  лет вероятное содержание  $^{234}\text{U}$  на Земле должно было уменьшиться в  $e^{(t \ln 2)/T} \approx 10^{4855}$  раз. Если даже предположить, что в момент образования Земля состояла только из  $^{234}\text{U}$ , то и тогда на Земле не осталось бы ни одного атома  $^{234}\text{U}$ . Изотоп  $^{234}\text{U}$  существует в природе благодаря  $\alpha$ -распаду  $^{238}\text{U}$  и  $\beta$ -распаду  $^{234}\text{Th}$  и  $^{234}\text{Pa}$ .

4.213.  $\approx 10$  протонов.

4.214.  $\frac{A_{2\text{max}}}{A_{10}} = 0,7$ .

4.215. а) 0,7; б)  $N_{\text{сд}} = N_{\text{осд}} e^{-\lambda t}$ ;  $N_{\text{ин}} = N_{\text{осд}} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ .

4.216. 1.  $N_\alpha = 8$ ,  $N_\beta = 6$ ; 2.  $N_\alpha = 6$ ,  $N_\beta = 4$ ; 3.  $N_\alpha = 7$ ,  $N_\beta = 4$ ; 4.  $N_\alpha = 8$ ,  $N_\beta = 4$ .

4.217.  $v = 1,52 \cdot 10^7$  м/с;  $E = E_\alpha \left( 1 + \frac{m_\alpha}{m_{\text{д.я}}} \right) = 4,87$  МэВ ( $m_\alpha$  – масса  $\alpha$ -частицы,  $m_{\text{д.я}}$  – масса дочернего ядра  $^{222}\text{Rn}$ ).

4.218.  $Q = 5,2 \cdot 10^{14}$  Дж.

4.219.  $U_0 = 29$  МэВ;  $l = 3,6 \cdot 10^{-12}$  см.

4.220.  $D_1/D_2 = 3,4$ .

4.221.  $E_1 = 5,4$  МэВ;  $E_\gamma = 0,82$  МэВ.

4.222. Энергии уровней: 0; 0,726; 1,673; 1,797 МэВ.

4.223.  $\theta = \pi - \arccos(p_e/p_\nu)$ , где  $p_e/p_\nu = \sqrt{E_k(E_k + 2mc^2)} / (E - E_k)$  ( $p_e$  и  $p_\nu$  – импульсы электрона и антинейтрино соответственно);  $\theta = 110^\circ$ .

4.224. а)  $E_{k_{\max}} = 0,97$  МэВ,  $E_{k_{\min}} = 94$  эВ;

б)  $E_{k_e} = 0,32$  МэВ,  $E_{k_\nu} = 0,65$  МэВ;

4.226. 1. 4.08 МэВ; 2. 3,29 МэВ.

4.231.  $E_k = E_{k0} \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \theta$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – масса  $\alpha$ -частицы и яд-

ра лития соответственно;  $E_k = 0,7$  МэВ.

4.232.  $\theta_n = 49^\circ$ .

4.233. 0,1 МэВ;  $30^\circ$ .

4.235. а) +19,8 МэВ; б) –3,1 МэВ; в) –13,5 МэВ.

4.236.  $v_\alpha = 9,3 \cdot 10^6$  м/с;  $v_{Li} = 5,3 \cdot 10^6$  м/с.

4.237. а) 4,4 МэВ; б) 18,1 МэВ; в) 6,2 МэВ; г) 0.

4.238.  $E_{k_{Be}} = \frac{1}{8}|Q|$ ;  $E_{k0} = \frac{3}{76}|Q| = 1,41$  МэВ. При решении следует

учесть, что при пороговом значении энергии налетающих частиц продукты реакции движутся с одинаковой скоростью.

4.239.  $1,61 \cdot 10^6$  кг;  $1,1 \cdot 10^4$  кг.

4.240.  $3 \cdot 10^{18}$  с<sup>-1</sup>; 1,1 МВт.

4.241.  $10^{16}$  лет;  $4,5 \cdot 10^7$   $\alpha$ -распадов.

4.242.  $2,9 \cdot 10^{26}$  атомов.

4.244.  $v \approx c$  в обоих случаях.

4.251. Хотя при температуре  $10^7$  К средняя энергия хаотического движения протонов много меньше энергии их кулоновского отталкивания на расстоянии  $5 \cdot 10^{-15}$  м, термоядерные реакции синтеза в недрах Солнца протекают, так как:

1) имеется достаточное количество протонов с энергией, значительно большей средней;

2) благодаря туннельному эффекту, возможно слияние протонов с энергией, несколько меньшей энергии их кулоновского отталкивания.

4.252.  $\approx 10^{10}$  лет.

4.253.  $E_\mu = \frac{(m_\pi^2 + m_\mu^2)c^2}{2m_\pi} = 215m_\mu c^2 = 109,8$  МэВ;  $p_\mu = \sqrt{E_\mu^2/c^2 - m_\mu^2 c^2} = 5,8m_\mu c$ ;  $\bar{p}_\nu = -\bar{p}_\mu$ .

## 5. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

5.16. а)  $6,6 \cdot 10^{-23}$  Н·с; б)  $3,3 \cdot 10^{-23}$  Н·с.

5.17. а)  $N = nv$ ,  $p = 2mnv^2$ ; б)  $N = nv \cos \alpha$ ,  $p = 2mnv^2 \cos \alpha$ .

5.18.  $p = 2mn(v \cos \alpha - u)^2$ .

5.19.  $\approx 93^\circ \text{C}$ .

5.20.  $3,49 \cdot 10^{12}$  лет.

5.21.  $p'/p = 1 + \alpha$ .

5.22. Можно.

5.23. На 11%.

5.24.  $9 \cdot 10^6$  Па.

5.25.  $1,35 \text{ кг/м}^3$ ;  $1,13 \cdot 10^5$  Па.

5.26. 
$$\rho = \frac{p_{\text{атм}}(m_1 - m_2)}{V(p_1 - p_2)}$$

5.27. 
$$m = m_{\text{ш}} \frac{M(p_0 + \rho_{\text{в}}gh)}{RT\rho_{\text{в}} - M(p_0 + \rho_{\text{в}}gh)} = 6,66 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$
 ( $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды,  $M$  – молярная масса воздуха).

5.28. 
$$V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{T_1 (p_0 + \rho_{\text{в}}gh)} = 0,55 \text{ м}^3$$

5.29. 
$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}{V_1 + V_2 + V_3} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

5.30.  $0,48 \text{ кг/м}^3$ .

5.31. а)  $9,16 \cdot 10^3$  Па; б)  $0,033 \text{ кг/моль}$ .

5.32.  $0,029 \text{ кг/моль}$ ;  $2,1 \cdot 10^4$  Па;  $7,8 \cdot 10^4$  Па;  $9,4 \cdot 10^2$  Па.

5.33. 
$$r_{\text{min}} = \frac{3\rho_{\text{с}}RT_0}{p_0(M - M_{\text{H}_2\text{O}})} = 2,71 \text{ м}$$

5.34. 
$$V_{\text{в}} = V \left( 1 - \frac{p}{p_0} \right) = 119 \text{ см}^3$$

5.35. а)  $3,5 \text{ см}$ ; б)  $> 95 \text{ см}$ .

5.36.  $375 \text{ мм рт. ст.}$

5.37.  $751 \text{ мм рт. ст.}$

5.38.  $x = l \frac{T - T_0}{2(T_1 + T_0)} = 0,02 \text{ м}$ ;  $p = p_0 \frac{T_1 + T_0}{2T_0} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

5.39. 
$$\Delta m = \frac{MpV}{RT_1} \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$5.40. m_2 = m_1 \frac{T_1}{5T_2} = 0,43 \text{ кг.}$$

$$5.41. N = \frac{V \left( p_0 + \frac{F}{S} \right)}{V_0 p_0} = 79.$$

$$5.42. 637.$$

$$5.43. p(t) = p_0 \exp(-Ct/V).$$

$$5.44. 127 \text{ с.}$$

$$5.59. V = 3,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3; N \approx 10^{12}.$$

$$5.60. \text{ а) } \frac{\Delta N}{N} = 1,7 \cdot 10^{-5}; \text{ б) } \frac{\Delta N}{N} = 3,3 \cdot 10^{-2}.$$

$$5.63. \text{ а) } 380 \text{ К; б) } 340 \text{ К.}$$

$$5.65. 330 \text{ К; } v = \sqrt{\frac{3RT}{M} \frac{n \ln n}{n-1}}.$$

$$5.66. v = \sqrt{\frac{3RT \ln(M_2/M_1)}{M_2 - M_1}} = 1610 \text{ м/с, } M_1 \text{ и } M_2 - \text{молярные массы}$$

соответственно водорода и гелия.

$$5.68. v = 2\pi R^2 v / s = 660 \text{ м/с.}$$

$$5.70. T = \frac{mv^2}{3k}.$$

$$5.72. N = \frac{nv_{\text{ср}}}{4} \quad (n - \text{концентрация молекул, } v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} - \text{средняя}$$

скорость при максвелловском распределении).

$$5.73. \varepsilon_{\text{н.в}} = \frac{1}{2} kT.$$

$$5.76. 3,5 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$5.77. 3,5 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$5.78. N_A = \frac{6RT \ln(n_1/n_2)}{\pi d^3 g \Delta \rho \Delta h}.$$

$$5.79. \text{Для атмосферы Земли } h_0 \approx 8,5 \text{ км, для Солнца } h_0 \approx 113 \text{ км.}$$

$$5.81. h = \frac{kT \ln(n_2/n_1)}{g(m_2 - m_1)}.$$

$$5.82. \text{ а) } 1,278 \text{ кг; б) } 0,772 \text{ кг.}$$

$$5.83. P = p_0 S \left( 1 - e^{-\frac{Mgh}{RT}} \right) = 5860 \text{ Н.}$$

$$5.84. Z = \frac{RT}{Mg}; \rho_0 / \rho_H = e \approx 2,7.$$

$$5.85. F = Sp_0 \left( e^{\frac{Mgh}{RT_2}} - e^{\frac{Mgh}{RT_1}} \right) \approx Sp_0 \frac{Mgh}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \approx 20 \text{ Н.}$$

$$5.86. E_p = kT; \alpha = \frac{e-1}{e} \approx 0,63.$$

$$5.87. p = p_0 e^{-\frac{M\omega^2 r^2}{8RT}} = 9,97 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$5.88. a = \eta \frac{RT}{Ml} = 623 \text{ м/с}^2.$$

$$5.102. 16,62 \text{ кДж.}$$

$$5.103. t_2 = t_1 + \frac{Mv^2}{iR}, \quad i - \text{число степеней свободы молекулы газа.}$$

$$5.104. c_v = \frac{R}{M(\gamma-1)}; \quad c_p = \frac{\gamma R}{M(\gamma-1)};$$

кислород:  $c_v = 6,49 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_p = 9,09 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

азот:  $c_v = 7,42 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_p = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

$$5.105. c_v = 650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$
;  $c_p = 906 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

$$5.106. \gamma \approx 1,47.$$

$$5.107. 59 \text{ кг.}$$

$$5.108. 23\%.$$

$$5.109. \text{ а) } 850 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$
; б) 1,385.

$$5.110. 5 \text{ м}^3$$
;  $5,5 \text{ м}^3$ .

$$5.111. Q = 0, \text{ так как } U = \frac{i}{2} pV = \text{const.}$$

$$5.112. 3,15 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

5.113. Сначала надо определить массу  $m_1$  продуктов сгорания в

$$\text{камере: } m_1 = \frac{Mp_1V}{RT_1}. \quad T_2 = T_1 + \frac{qm}{c_v m_1} = T_1 \left( 1 + \frac{qmR}{Mc_v p_1 V_1} \right) \approx 1958 \text{ К};$$

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$5.114. c_v = 3,12 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$
.

$$5.115. 450^\circ\text{C.}$$

$$5.117. \gamma = \frac{\ln[(p_0 + mg/S)/p_0]}{\ln[l/(l-h)]} = 1,4.$$

$$5.118. \gamma = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(p_1/p_3)} = 1,4.$$

$$5.119. \text{а) } \frac{A}{Q} = \frac{2}{i+2}; 0,4 \text{ (O)}, 0,29 \text{ (O}_2\text{)}, 0,25 \text{ (O}_3\text{)};$$

$$\text{б) } \frac{\Delta U}{Q} = \frac{i}{i+2}; 0,6 \text{ (O)}, 0,71 \text{ (O}_2\text{)}, 0,75 \text{ (O}_3\text{)}.$$

$$5.120. \Delta U_1 = 250 \text{ Дж}, Q_1 = -650 \text{ Дж}, A_1 = -900 \text{ Дж};$$

$$\Delta U_2 = 250 \text{ Дж}, Q_2 = -50 \text{ Дж}, A_2 = -300 \text{ Дж}.$$

$$5.121. \frac{A_{\text{адиаб}}}{A_{\text{изотерм}}} = \frac{n^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{(\gamma-1)\ln n}, \text{ а) } 0,79; \text{ б) } 1,48.$$

$$5.122. 600 \text{ Дж}; 1000 \text{ Дж}; 1,6.$$

$$5.123. Q = \nu RT_0(1 - 1/n) = 2500 \text{ Дж}.$$

$$5.124. \gamma = 1 + \frac{n-1}{Q/(\nu RT_0) - \ln n} = 1,4.$$

$$5.125. A = p_0 S(h_1 + h_0 \ln \frac{h_0 + h_1}{h_0}) = 2,37 \text{ Дж}.$$

$$5.126. \text{а) } \Delta U = \frac{i}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1) = \frac{5}{6} p_1 V_1;$$

$$\text{б) } A' = -A = p_1(V_1 - V_2) + \frac{1}{2}(p_2 - p_1)(V_1 - V_2) = \frac{5}{3} p_1 V_1; A - \text{ работа газа,}$$

$A'$  – работа, совершаемая над газом.

$$5.127. \text{ Не является, } 4 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

$$5.128. C = \frac{R(n-\gamma)}{(n-1)(\gamma-1)}; C < 0 \text{ при } 1 < n < \gamma.$$

$$5.129. n = \frac{\ln \beta}{\ln \alpha} = 1,5; C = \frac{R(n-\gamma)}{(n-1)(\gamma-1)} = -4,157 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

$$5.130. \text{а) } C = \frac{3}{2} \frac{R(n-\gamma)}{n-1} = -4,155 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}; \text{ б) } Q = -4,155 \text{ Дж};$$

$$\text{в) } A = 8,31 \text{ Дж}.$$

$$5.138. \Delta S = \nu R \ln 2.$$

$$5.147. \Delta S = R(\nu_1 \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1} + \nu_2 \ln \frac{V_1 + V_2}{V_2}) = 6,34 \text{ Дж/К}.$$

5.150.  $\Delta S = \nu R \ln n = 20 \text{ Дж/К}$ .

5.151. а)  $\Delta S = -\frac{m}{M} R \ln 2 = -2,88 \text{ Дж/К}$ ; б)  $\Delta S = \frac{m}{M} R \ln 2 = 2,88 \text{ Дж/К}$ .

5.152.  $\Delta S = \frac{\nu R(\gamma \ln \alpha - \ln \beta)}{\gamma - 1} = -11 \text{ Дж/К}$ .

5.153.  $\Delta S = \frac{\nu(n-\gamma)R \ln \tau}{(n-1)(\gamma-1)}$ .

5.154.  $\Delta S = \frac{\nu(\gamma+1)R \ln \alpha}{(\gamma-1)} = 46 \text{ Дж/К}$ .

5.155.  $n = \frac{\Delta S(\gamma-1) - \nu R \gamma \ln(T_2/T_1)}{\Delta S(\gamma-1) - \nu R \ln(T_2/T_1)} = 2,12$ .

5.156.  $\Delta S = \frac{Q}{\Delta T} \ln \frac{T_2}{T_1} = 340 \text{ Дж/К}$ .

5.157.  $4,2 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ .

5.159.  $A = \frac{m\gamma}{M(\gamma-1)} R(T_2 - T_1) \ln \frac{T_2}{T_1} = 4,41 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ .

5.161. а)  $\eta = 1 - n^{1-\gamma} = 0,24$ ; б)  $\eta = 1 - n^{1-\gamma} = 0,18$ .

5.162.  $\frac{A_k}{A} = \frac{(p_1 V_1 - p_2 V_2) \ln 2}{(V_2 - V_1)(p_1 - p_2)} = 2,1$ .

5.163.  $\eta = 1 + \frac{T_3 + T_4}{T_1 + T_2}$ .

5.164.  $5,9 \text{ кг}$ .

5.165.  $Q = A \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 8,8 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ .

5.166.  $T = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} T_0 = 244,2 \text{ К}$ .

5.184.  $B \text{ } 18,5 \text{ раз}$ .

5.185.  $7 \cdot 10^{28}$ .

5.186.  $2,13 \text{ Па}$ .

5.187. а)  $\lambda = \text{const}$ ,  $z \sim \sqrt{\eta}$ ; б)  $\lambda \sim \frac{1}{\eta}$ ;  $z \sim \eta$ .

5.188.  $9,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

5.189. а)  $\lambda = \text{const}$ ,  $z \sim \sqrt{T}$ ; б)  $\lambda \sim T$ ;  $z \sim T^{-1/2}$ .

5.190. а)  $1,625 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $60 \text{ нм}$ ; в)  $600 \text{ м/с}$ .

5.191.  $8,93 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К).

5.193.  $p_2 / p_1 = \alpha^3 / \beta = 2$ .

5.194. а)  $D \sim n$ ;  $\eta = \text{const}$ ; б)  $D \sim n^{3/2}$ ;  $\eta \sim n^{1/2}$ .

5.195. а)  $\eta = \text{const}$ ; б)  $\eta \sim n^{-1/2}$ ; в)  $\eta \sim n^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ .

5.196. а)  $n = 3$ ; б)  $n = 1$ ; в)  $n = 1$ .

5.197.  $F = \frac{2\nu S}{3\pi d^2 h N_A} \sqrt{\frac{MRT}{\pi}} = 0,45$  Н,  $M$  – молярная масса воздуха,

$N_A$  – число Авогадро.

5.198.  $\eta = \frac{F(R-r)}{4\pi^2 R r n h} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

5.199.  $3,25 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К).

5.200.  $Q = \kappa \frac{l_1 - l_2}{d} S t = 3,15 \cdot 10^4$  Дж.

5.201.  $\varphi = \frac{k(T_2 - T_1)}{\pi d^2 l} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}} \approx 19,3$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ,  $M$  – молярная

масса гелия.

5.202. а)  $\kappa = \frac{\Phi(r_2 - r_1)}{4\pi r_1 r_2 (T_1 - T_2)} = 13,3$  Вт/(м·К);

б)  $T(r) = T_1 - (T_1 - T_2) \left( \frac{1 - r_1 / r}{1 - r_1 / r_2} \right)$ .

5.203.  $T(r) = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \ln(r / r_1)}{\ln(r_2 / r_1)}$ .

5.219. а)  $2,49 \cdot 10^6$  Па; б)  $2,36 \cdot 10^6$  Па; в)  $2,57 \cdot 10^6$  Па; г)  $2,43 \cdot 10^6$  Па.

5.220.  $a = 0,133$  м<sup>6</sup>·Па/моль<sup>2</sup>;  $b = 4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/моль.

5.221.  $\frac{\Delta v}{v} = \frac{pb}{RT} = 0,032$ .

5.222.  $T = \frac{a}{Rb}$ ; 1027 К и 107 К.

5.223.  $A = \nu RT \ln \frac{V_{m2} - \nu b}{V_{m1} - \nu b} - \nu^2 a \left( \frac{1}{V_{m1}} - \frac{1}{V_{m2}} \right)$ ; а) 2,7 кДж; б) 2,74 кДж.

5.224.  $Q = \nu^2 a (V_2 - V_1) / (V_1 V_2) = 0,33$  Дж.

5.225.  $a = \frac{A V_1 V_2}{\nu^2 (V_2 - V_1)} = 0,139$  м<sup>6</sup>·Па/моль<sup>2</sup>.

$$5.226. \text{ а) } \Delta U = v^2 a \left( \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) = 123,3 \text{ Дж};$$

$$\text{б) } A = vRT \ln \frac{V_2 - vb}{V_1 - vb} + v^2 a \left( \frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) = 3240 \text{ Дж};$$

$$\text{в) } Q = vRT \ln \frac{V_2 - vb}{V_1 - vb} = 3363 \text{ Дж}.$$

$$5.227. \Delta S = vC_v \ln \frac{T_2}{T_1} + vR \ln \frac{V_2 - vb}{V_1 - vb}.$$

$$5.228. 4,15 \text{ Дж/К}.$$

$$5.229. 0,036.$$

$$5.230. T_{\kappa} = \frac{8}{27} \frac{a}{bR} = 304 \text{ К}; \rho_{\kappa} = \frac{1}{3} \frac{M}{b} = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3.$$

$$5.231. \lambda = \frac{4kT_0}{\sqrt{2}\pi p_0} \left( \frac{16\pi p_{\kappa}}{3kT_{\kappa}} \right)^{2/3}.$$

$$5.232. a = \frac{27R^2 T_{\kappa}}{64 p_{\kappa}} = 0,36 \text{ м}^6 \cdot \text{Па/моль}^2; b = \frac{RT_{\kappa}}{8 p_{\kappa}} = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

$$5.233. T = \frac{1}{R} \left( p + \frac{v^2 a}{V^2} \right) \left( \frac{V}{v} - b \right) = 270 \text{ К}.$$

$$5.234. \text{ В } 8/3 \text{ раза}.$$

$$5.244. l = \frac{4\sigma(p_0 + \rho g h_0)}{\rho_0 d \rho g} = 0,144 \text{ м} (\sigma - \text{поверхностное натяжение}).$$

$$5.245. r_2 = \frac{2\sigma}{\rho g h + 2\sigma / r_1} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

$$5.246. h = \frac{4\sigma d_2}{g\rho(d_2^2 - d_1^2)} = 3,27 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

$$5.247. 0,28 \text{ мм рт. ст}.$$

$$5.248. 1,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$5.249. \text{ а) } h = \frac{2\sigma}{\rho g a} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \text{ б) } F = \left( \frac{2\sigma}{a} \right)^2 \frac{l}{\rho g} = 0,8 \text{ Н}.$$

$$5.250. 10 \text{ мм}.$$

$$5.251. h = \frac{1}{\rho g} \left( p_0(\eta^3 - 1) + \frac{2\sigma}{r} \eta(\eta^2 - 1) \right) = 6,7 \text{ м}.$$

$$5.252. \sigma = \frac{1}{8} p_0 d (1 - \eta^3 / n) / (\eta^2 - 1).$$

$$5.253. A = \frac{6m\sigma}{\rho d} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

$$5.254. \text{ На } 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$$

$$5.269. 0,0012 \text{ К.}$$

$$5.270. \Delta T = -\frac{T\Delta\rho\Delta V}{\lambda} = -0,0075 \text{ К, } \lambda - \text{ удельная теплота плавления}$$

льда.

$$5.271. \frac{\Delta m}{m} = \frac{c\rho T\Delta T}{\lambda^2} = 0,03, \lambda - \text{ удельная теплота плавления льда.}$$

$$5.272. p(T) = p_0 \exp\left[\frac{Mr}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right].$$

$$5.273. m_n = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ кг; } t = 116 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$5.274. 59\%.$$

$$5.275. 9^\circ\text{C.}$$

$$5.276. \eta = \frac{n-1}{N-1}; \eta = \frac{1}{N+1}.$$

$$5.277. \text{ а) } 2,4 \cdot 10^3 \text{ Па; б) } 1,73 \cdot 10^{-5} \text{ кг; в) } 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3; \text{ г) } 269 \text{ К;}$$

$$\text{ д) } 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ кг.}$$

$$5.278. A = \Delta m RT / M = 120 \text{ Дж.}$$

$$5.279. \eta = 1 - \frac{RT}{rM} = 0,92, r - \text{ удельная теплота испарения воды при}$$

$$t = 100 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$5.280. \Delta U = rm - \frac{m}{M} RT = 7,2 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$5.281. r = \frac{RT_1 T_2 \ln(p_1 / p_2)}{M(T_2 - T_1)} = 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/кг.}$$

$$5.282. 2,87 \text{ Дж/К.}$$

$$5.283. 8,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/К.}$$

$$5.284. 87 \text{ Дж/К.}$$

$$5.289. 1 \text{ м.}$$

$$5.290. 34 \text{ см.}$$

$$5.291. 4,5 \text{ мм.}$$

$$5.292. F_0 = F + SE\alpha(t_2 - t_1) = 144 \text{ Н, где } E - \text{ модуль Юнга, } \alpha - \text{ коэф-}$$

$$\text{фициент линейного расширения стали; } \Delta f / f \approx 0,21.$$

5.293.  $F_0 = SE\alpha(t_2 - t_1) \approx 2,82 \cdot 10^4$  Н ( $E$  – модуль Юнга,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения стали).

5.294. На 10,4 с.

5.295. В 1,0048 раза.

5.299. а)  $T = \frac{T_2 R_1 + T_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ; б)  $\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R + R_2}$ , где  $R_1 = \frac{1}{\kappa_1} \frac{l_1}{S}$ ;  $R_2 = \frac{1}{\kappa_2} \frac{l_2}{S}$  –

тепловые сопротивления брусков.

5.300.  $\Phi = \frac{(T_1 - T_2)(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$ , где  $R_1$  и  $R_2$  – тепловые сопротивления

брусков (см. ответ к задаче 5.299).

5.301.  $5,69 \cdot 10^6$  Дж.

5.302. 7,66 Вт.

5.303.  $Q = \frac{2\pi\kappa\tau(t_2 - t_1)l}{\ln(d_2 / d_1)} = 8,4 \cdot 10^5$  Дж ( $\tau$  – продолжительность суток).

5.304. Температура слоя сажи 400...200°C; железа – 200...195°C; накипи – 195 ... 83°C.

5.305. 0,013°C.

5.306.  $5,88 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $2,6 \cdot 10^{18}$  Дж.

5.307. Через 15 ч.

5.309.  $c_{\text{Ag}} = 2,3 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К);  $c_{\text{Pb}} = 1,2 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К).

5.310.  $3,5 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К).

# **ПРИЛОЖЕНИЕ**



## 1. Физические постоянные

Скорость распространения электромагнитных волн (скорость света) в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Стандартное (нормальное) ускорение свободного падения	$g = 9,807$ м/с <sup>2</sup>
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Молярный объем идеального газа (при нормальных условиях)	$V_m = 2,241 \cdot 10^{-2}$ м <sup>3</sup> /моль
Газовая (молярная) постоянная	$R = 8,314$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Фарадея	$F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Элементарный заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж/К
Масса электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Ридберга	$R = 1,097 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Радиус первой бортовой орбиты	$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м
Энергия связи электрона в атоме водорода	$E = 13,6$ эВ
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_e = 2,426 \cdot 10^{-12}$ м
Классический радиус электрона	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Ядерный магнетон	$\mu_N = 5,051 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ м/Ф
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
	$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$ Гн/м

## 2. Сведения о Солнце, Земле и Луне

Средний радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,96 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Среднее расстояния от Земли до Солнца	$1,49 \cdot 10^8$ км
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22}$ кг
Среднее расстояния от Земли до Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м
Угловая скорость вращения Земли	$7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/с

### 3. Плотность $\rho$ некоторых веществ

Твердые вещества	$\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$	Жидкости	$\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$
Алмаз	3,5	Бензол	0,88
Алюминий	2,7	Вода	1,00
Вольфрам	19,1	Глицерин	1,26
Графит	1,6	Касторовое масло	0,90
Железо (сталь)	7,8	Керосин	0,80
Золото	19,3	Ртуть	13,6
Кадмий	8,65	Спирт	0,79
Кобальт	8,9	Тяжелая вода	1,1
Лед	0,916	Эфир	0,72
Литий	0,534		
Медь	8,9	Газы (при нормальных условиях)	$\rho$ , $\text{кг/м}^3$
Молибден	10,2		
Натрий	0,97	Азот	1,25
Никель	8,9	Аммиак	0,77
Олово	7,4	Водород	0,09
Платина	21,5	Воздух	1,293
Пробка	0,20	Кислород	1,43
Свинец	11,3	Метан	0,72
Серебро	10,5	Углекислый газ	1,98
Титан	4,5	Хлор	3,21
Уран	19,0		
Фарфор	2,3		
Цинк	7,0		

### 4. Модуль упругости (модуль Юнга) некоторых материалов, ГПа

Алюминий	70	Сталь (железо)	200
Медь	130	Стекло	60
Свинец	16	Вода	–

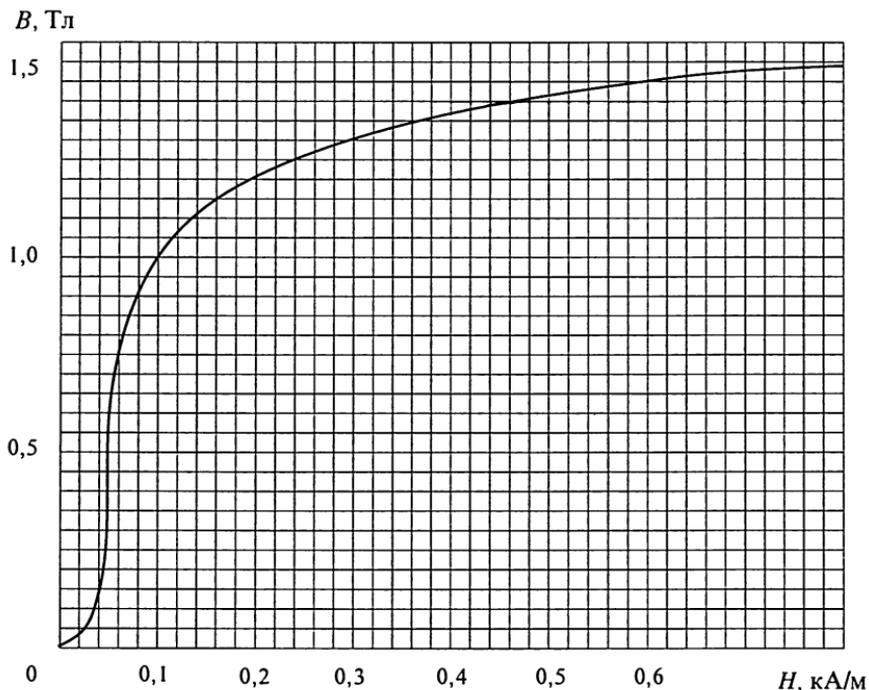
### 5. Удельное сопротивление $\rho$ проводников (при 20 °С) и изоляторов и температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha$ металлов

Проводник	$\rho$ , нОм·м	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>	Изолятор	$\rho$ , Ом·м
Алюминий	25	0,0045	Бумага	$10^{10}$
Вольфрам	50	0,0048	Парафин	$10^{15}$
Железо	90	0,0065	Слюда	$10^{13}$
Золото	20	0,0040	Фарфор	$10^{13}$
Медь	16	0,0043	Шеллак	$10^{14}$
Свинец	190	0,0042	Эбонит	$10^{14}$
Серебро	15	0,0041	Янтарь	$10^{17}$

## 6. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ различных веществ

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
Вода	81	Полиэтилен	2,3
Воздух	1,00058	Слюда	7,5
Воск	7,8	Спирт	26
Керосин	2,0	Стекло	6,0
Парафин	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Эбонит	2,7

## 7. Основная кривая намагничивания технического железа



## 8. Интервалы длин волн и соответствующие им цвета видимой части спектра

Цвет спектра	Длина волны, нм	Цвет спектра	Длина волны, нм
Фиолетовый	400 – 450	Желтый	560 – 590
Синий	450 – 480	Оранжевый	590 – 620
Голубой	480 – 500	Красный	620 – 760
Зеленый	500 – 560		

## 9. Показатель преломления $n$ некоторых веществ в видимом диапазоне длин волн

Газ	$n$	Жидкость	$n$	Твердое вещество	$n$
Азот	1,00030	Бензол	1,50	Алмаз	2,42
Воздух	1,00029	Вода	1,33	Кварц плавленный	1,46
Кислород	1,00027	Глицерин	1,47	Стекло (обычное)	1,50
		Сероуглерод	1,63	Лед	1,31

Примечание. Показатели преломления зависят и от длины волны света, поэтому приведенные здесь значения  $n$  следует рассматривать как условные.

## 10. Работа выхода $A$ электрона из металла

Металл	$A$ , эВ	Металл	$A$ , эВ	Металл	$A$ , эВ
Алюминий	3,74	Калий	2,15	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74

## 11. Край $K$ -полосы поглощения

Порядковый номер элемента	Элемент	$\lambda_K$ , пм	Порядковый номер элемента	Элемент	$\lambda_K$ , пм
23	V	226,8	47	Ag	48,60
26	Fe	174,1	50	Sn	42,39
27	Co	160,4	74	W	17,85
28	Ni	148,6	78	Pt	15,85
29	Cu	138,0	79	Au	15,35
30	Zn	128,4	82	Pb	14,05
42	Mo	61,9	92	U	10,75

## 12. Свойства изотопов

Порядковый номер изотопа	Изотоп	Спин ядра	Избыток массы атома $m - A$ , а.е.м.	% атомов в природной смеси	Тип распада	Период полураспада	Энергия $\alpha$ -, $\beta$ -частиц, МэВ
1	$n$	1/2	0,008665	—	$\beta^-$	11,7 мин	0,78
	$^1\text{H}$	1/2	0,007825	99,985			
	$^2\text{H}$	1	0,014102	0,015			
2	$^3\text{H}$	1/2	0,016049	—	$\beta^-$	12,3 года	0,018
	$^4\text{He}$	1/2	0,016030	$3 \cdot 10^{-4}$			
3	$^4\text{He}$	0	0,002604	$\sim 100$			
	$^6\text{Li}$	1	0,015126	7,52			

Порядковый номер изотопа	Изотоп	Спин ядра	Избыток массы атома $m-A$ , а е.м.	% атомов в природной смеси	Тип распада	Период полураспада	Энергия $\alpha$ -, $\beta$ -частиц, МэВ
4	<sup>7</sup> Li	3/2	0,016005	92,48	$K$	53 дня $10^{-16}$ с	0,039
	<sup>7</sup> Be	3/2	0,016931	—			
	<sup>8</sup> Be	0	0,005308	—	$2\alpha$		
	<sup>9</sup> Be	3/2	0,012186	100			
5	<sup>10</sup> Be	0	0,013535	—	$\beta^-$	$2,5 \cdot 10^6$ лет	0,555
	<sup>10</sup> B	3	0,012939	20			
	<sup>11</sup> B	3/2	0,009305	80			
6	<sup>11</sup> C	3/2	0,011431	—	$\beta^+$	20,4 мин	0,97
	<sup>12</sup> C	0	0	98,89			
	<sup>13</sup> C	1/2	0,003354	1,11			
	<sup>14</sup> C	0	0,003242	—			
7	<sup>13</sup> N	—	0,005739	—	$\beta^+$	5570 лет 10 мин	0,155 1,2
	<sup>14</sup> N	1	0,003074	99,63			
	<sup>15</sup> N	1/2	0,000108	0,37			
8	<sup>15</sup> O	—	0,003072	—	$\beta^+$	2,1 мин	1,68
	<sup>16</sup> O	0	-0,005085	99,76			
	<sup>17</sup> O	5/2	-0,000867	0,037			
	<sup>18</sup> O	0	-0,000840	0,204			
9	<sup>18</sup> F	—	0,000950	—	$\beta^+$	1,87 ч	0,649
	<sup>19</sup> F	1/2	-0,001595	100			
	<sup>20</sup> F	—	-0,000015	—			
10	<sup>20</sup> Ne	0	-0,007560	90,92	$\beta^-$	12 с	5,42
	<sup>21</sup> Ne	—	-0,006151	0,26			
	<sup>22</sup> Ne	0	-0,008616	8,82			
11	<sup>22</sup> Na	3	-0,005565	—	$\beta^+$	2,6 года	0,540
	<sup>23</sup> Na	3/2	-0,010227	100			
	<sup>24</sup> Na	4	-0,009033	—			
12	<sup>23</sup> Mg	—	-0,005865	—	$\beta^+$	15 ч 11 с	1,39 2,95
	<sup>24</sup> Mg	0	-0,014956	78,60			
	<sup>25</sup> Mg	5/2	-0,014160	10,11			
	<sup>26</sup> Mg	0	-0,017409	11,29			
	<sup>27</sup> Mg	1/2	-0,015655	—			
13	<sup>26</sup> Al	—	-0,013100	—	$\beta^+$	9,5 мин 6,7 с	1,75 и 1,59 3,20
	<sup>27</sup> Al	5/2	-0,018465	100			
	<sup>28</sup> Al	3	-0,018092	—			
14	<sup>28</sup> Si	0	-0,023073	92,27	$\beta^-$	2,3 мин	2,86
	<sup>29</sup> Si	1/2	-0,023509	4,68			
	<sup>30</sup> Si	0	-0,026239	3,05			
	<sup>31</sup> Si	—	-0,024651	—			
15	<sup>30</sup> P	—	-0,021680	—	$\beta^+$	2,65 ч 2,5 мин	1,47 3,24
	<sup>31</sup> P	1/2	-0,026237	100			
	<sup>32</sup> P	—	-0,026092	—			
16	<sup>32</sup> S	0	-0,027926	95,02	$\beta^-$	14,3 дня	1,71
	<sup>33</sup> S	3/2	-0,028540	0,75			
	<sup>34</sup> S	0	-0,032136	4,21			
	<sup>35</sup> S	3/2	-0,030966	—			

Порядковый номер изотопа	Изотоп	Спин ядра	Избыток массы атома $m-A$ , а.е.м.	% атомов в природной смеси	Тип распада	Период полураспада	Энергия $\alpha$ -, $\beta$ -частиц, МэВ
17	<sup>35</sup> Cl	3/2	-0,031146	75,4	$\beta^-$ , K	3,1·10 <sup>5</sup> лет	0,714
	<sup>36</sup> Cl	2	-0,031688	-			
18	<sup>37</sup> Cl	3/2	-0,034104	24,6	K	32 дня	0,565
	<sup>36</sup> Ar	0	-0,032452	0,34			
	<sup>37</sup> Ar	3/2	-0,033228	-			
19	<sup>39</sup> Ar	-	-0,035679	-	$\beta^-$	265 лет	3,55 и 1,99
	<sup>40</sup> Ar	0	-0,037616	99,60	$\beta^-$	1,52 ч	
	<sup>39</sup> K	3/2	-0,036286	93,08			
	<sup>42</sup> K	2	-0,037583	-	K	28 дней	
24	<sup>51</sup> Cr	7/2	-0,055214	-	K, $\beta^+$	72 дня	0,47
25	<sup>55</sup> Mn	5/2	-0,061946	100			
27	<sup>58</sup> Co	2	-0,064246	-	$\beta^-$	5,2 года	0,31
	<sup>59</sup> Co	7/2	-0,066811	100			
29	<sup>60</sup> Co	4	-0,066194	-	K, $\beta^+$	245 дней	0,325
	<sup>63</sup> Cu	3/2	-0,070406	69,1			
30	<sup>65</sup> Cu	3/2	-0,072214	30,9	$\beta^-$	36 ч	0,456
	<sup>65</sup> Zn	5/2	-0,070766	-			
35	<sup>82</sup> Br	6	-0,083198	-	$\beta^-$	51 день	1,46
38	<sup>88</sup> Sr	0	-0,09436	82,56			
	<sup>89</sup> Sr	5/2	-0,09257	-	$\beta^-$	28 лет	0,535
	<sup>90</sup> Sr	0	-0,09223	-	$\beta^-$	64 ч	2,24
39	<sup>90</sup> Y	2	-0,09282	-	$\beta^-$ , K	25 мин	2,12 и 1,67
47	<sup>107</sup> Ag	1/2	-0,09303	51,35			
53	<sup>127</sup> I	5/2	-0,09565	100	$\beta^-$ , K	2,7 дня	0,96
	<sup>128</sup> I	1	-0,09418	-			
79	<sup>197</sup> Au	3/2	-0,03345	100	$\beta^-$	4,1 года	0,77
	<sup>198</sup> Au	2	-0,03176	-			
81	<sup>204</sup> Tl	-	-0,02611	-	$\beta^-$	22 мин	1,23
82	<sup>206</sup> Pb	0	-0,02554	23,6			
	<sup>207</sup> Pb	1/2	-0,02410	22,6	$\alpha$	2,5·10 <sup>5</sup> лет	4,76 и 4,72
	<sup>208</sup> Pb	0	-0,02336	52,3			
83	<sup>209</sup> Bi	9/2	-0,01958	100	$\alpha$	7,1·10 <sup>8</sup> лет	4,20 - 4,58
	<sup>210</sup> Bi	4	-0,01589	-			
84	<sup>210</sup> Po	-	-0,01713	-	$\alpha$	2,4·10 <sup>4</sup> лет	5,50 и 5,45
86	<sup>222</sup> Rn	-	0,01753	-			
88	<sup>226</sup> Ra	0	0,02536	-	$\alpha$	23,5 мин	1,21
90	<sup>232</sup> Th	0	0,03821	100			
	<sup>233</sup> Th	-	0,04143	-	$\beta^-$	89,6 лет	5,50 и 5,45
92	<sup>234</sup> U	0	0,04090	0,006	$\alpha$	2,4·10 <sup>4</sup> лет	5,15 - 5,10
	<sup>235</sup> U	7/2	0,04393	0,71			
	<sup>236</sup> U	0	0,04573	-	$\alpha$	4,5·10 <sup>9</sup> лет	4,13 и 4,18
	<sup>238</sup> U	0	0,05076	99,28			
	<sup>239</sup> U	-	0,05432	-			
94	<sup>238</sup> Pu	-	0,04952	-	$\alpha$	2,4·10 <sup>4</sup> лет	5,15 - 5,10
	<sup>239</sup> Pu	1/2	0,05216	-			

### 13. Постоянные газов

Газ (относительная молекулярная масса)	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	Теплопроводность $\kappa, \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Вязкость $\eta, \text{мкПа} \cdot \text{с}$	Диаметр молекулы $d, \text{нм}$	Постоянные Ван-дер-Ваальса	
					$a, \frac{\text{м}^6 \cdot \text{Па}}{\text{моль}^2}$	$b, 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
He (4)	1,67	141,5	18,9	0,20	–	–
Ar (40)	1,67	16,2	22,1	0,35	0,132	32
H <sub>2</sub> (2)	1,41	168,4	8,4	0,27	0,024	27
N <sub>2</sub> (28)	1,40	24,3	16,7	0,37	0,137	39
O <sub>2</sub> (32)	1,40	24,4	19,2	0,35	0,137	32
CO <sub>2</sub> (44)	1,30	23,2	14,0	0,40	0,367	43
H <sub>2</sub> O (18)	1,32	15,8	9,0	0,30	0,554	30
Воздух (29)	1,40	24,1	17,2	0,35	–	–

Примечание. Значения  $\gamma, \kappa, \eta$  даны при нормальных условиях.

### 14. Тепловые свойства веществ

Вещество	Удельная теплоемкость* $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Удельная теплота парообразования** $r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Удельная теплота плавления, $\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Вода	4,18	2250	–
Глицерин	2,42	–	–
Ртуть	0,14	284	–
Спирт	2,42	853	–
Алюминий	0,90	–	321
Железо	0,46	–	270
Лед	2,09	–	333
Медь	0,39	–	175
Серебро	0,23	–	88
Свинец	0,13	–	25

\* При нормальных условиях.  
\*\* При нормальном атмосферном давлении.

### 15. Температурный коэффициент линейного расширения (при комнатной температуре), $10^{-6} \text{К}^{-1}$

Алюминий	22,9	Сталь (железо)	11
Латунь	18,9	Стекло обычное	8,5
Медь	16,7		

**16. Давление  $p$  и плотность насыщенного водяного пара  $\rho$  при различных температурах  $t$**

$t, ^\circ\text{C}$	$p$		$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p$		$\rho, \text{г/м}^3$
	мм. рт. ст.	кПа			мм. рт. ст.	кПа	
-23	0,58	0,077	0,66	15	12,79	1,705	12,8
0	4,58	0,610	4,84	16	13,63	1,817	13,6
1	4,93	0,657	5,22	17	14,53	1,937	14,5
2	5,29	0,705	5,60	18	15,48	2,063	15,4
3	5,69	0,758	5,98	19	16,48	2,197	16,3
4	6,10	0,813	6,40	20	17,54	2,338	17,3
5	6,54	0,872	6,84	21	18,65	2,486	18,3
6	7,04	0,934	7,3	22	19,83	2,643	19,4
7	7,51	1,001	7,8	23	21,07	2,809	20,6
8	8,05	1,073	8,3	24	22,38	2,983	21,8
9	8,61	1,148	8,8	25	23,76	3,167	23,0
10	9,21	1,228	9,4	26	25,21	3,360	24,4
11	9,84	1,312	10,0	27	26,74	3,564	25,8
12	10,52	1,402	10,7	28	28,35	3,779	27,2
13	11,23	1,497	11,4	29	30,04	4,004	28,7
14	11,99	1,598	12,1	30	31,82	4,242	30,3

**17. Свойства насыщенного водяного пара**

Давление, атм	Температура, $^\circ\text{C}$	Удельный объем пара, $\text{м}^3/\text{кг}$	Скрытая теплота испарения, кДж/кг
0,02	17,2	68,3	2456
0,1	45,4	14,96	2387
0,2	59,7	7,80	2359
0,4	75,4	4,071	2321
0,6	85,45	2,785	2296
0,8	93,0	2,127	2277
0,9	96,2	1,505	2268
1	99,1	1,726	2261
1,0333	100	1,674	2259
1,23	105	1,420	2241
1,8	116,3	0,996	2214
2	119,6	0,902	2205
3	132,9	0,617	2167
4	142,9	0,4708	2136
5	151,1	0,3818	2110
6	158,1	0,3214	2087
7	164,2	0,2778	2066
8	169,6	0,2448	2047
9	174,5	0,2189	2030
10	179,0	0,1980	2013
12	187,1	0,1663	1983
14	194,1	0,1434	1955
16	200,4	0,1261	1930
18	206,2	0,1125	1906
20	211,4	0,1015	1884
30	232,8	0,0679	1789
40	249,2	0,0506	1711

**18. Поверхностное натяжение некоторых жидкостей (при нормальных условиях), мН/м**

Вода	73	Ртуть	490
Глицерин	66	Спирт	22

**19. Теплопроводность различных веществ, Вт/(м·К)**

Алюминий	210	Свинец	35
Висмут	10	Кирпич	0,17
Железо	59	Стекло	0,17
Медь	380		

**20. Приставки СИ для образования десятичных кратных и дольных единиц**

Э – экса, $10^{18}$	к – кило, $10^3$	мк – микро, $10^{-6}$
П – пета, $10^{15}$	г – гекто, $10^2$	н – нано, $10^{-9}$
Т – тера, $10^{12}$	д – деци, $10^{-1}$	п – пико, $10^{-12}$
Г – гига, $10^9$	с – санти, $10^{-2}$	ф – фемто, $10^{-15}$
М – мега, $10^6$	м – милли, $10^{-3}$	а – атто, $10^{-18}$

**21. Греческий алфавит**

Буквы прописные, строчные	Название буквы
Α, α	áльфа
Β, β	бéта
Γ, γ	га́мма
Δ, δ	де́льта
Ε, ε	эпсилóн
Ζ, ζ	дзéта
Η, η	э́та
Θ, θ	тéта
Ι, ι	йóта
Κ, κ	ка́ппа
Λ, λ	ла́мбда
Μ, μ	ми (мю)
Ν, ν	ни (ню)
Ξ, ξ	кси
Ο, ο	омикрóн
Π, π	пи
Ρ, ρ	ро
Σ, σ	сíγμα
Τ, τ	та́у
Υ, υ	ипсилóн
Φ, φ	фи
Χ, χ	хи
Ψ, ψ	пси
Ω, ω	омéга

## 22. Периодическая система Д.И.Менделеева

периоды	ряды	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА				
		I	II	III	IV	V
1	I	(H)				
2	II	<sup>3</sup> Li 6,941 ЛИТИЙ	<sup>4</sup> Be 9,01218 БЕРИЛЛИЙ	<sup>5</sup> B 10,81 БОР	<sup>6</sup> C 12,011 УГЛЕРОД	<sup>7</sup> N 14,0067 АЗОТ
3	III	<sup>11</sup> Na 22,98977 НАТРИЙ	<sup>12</sup> Mg 24,305 МАГНИЙ	<sup>13</sup> Al 26,98154 АЛЮМИНИЙ	<sup>14</sup> Si 28,086 КРЕМНИЙ	<sup>15</sup> P 30,97376 ФОСФОР
4	IV	<sup>19</sup> K 39,0983 КАЛИЙ	<sup>20</sup> Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	<sup>21</sup> Sc 44,9559 СКАНДИЙ	<sup>22</sup> Ti 47,90 ТИТАН	<sup>23</sup> V 50,9415 ВАНАДИЙ
	V	<sup>29</sup> Cu 63,546 МЕДЬ	<sup>30</sup> Zn 65,38 ЦИНК	<sup>31</sup> Ga 69,735 ГАЛЛИЙ	<sup>32</sup> Ge 72,59 ГЕРМАНИЙ	<sup>33</sup> As 74,9216 АРСЕН
5	VI	<sup>37</sup> Rb 85,467 РУБИДИЙ	<sup>38</sup> Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	<sup>39</sup> Y 88,9059 ИТРИЙ	<sup>40</sup> Zr 91,22 ЦЕРКОНИЙ	<sup>41</sup> Nb 92,9054 НИОБИЙ
	VII	<sup>47</sup> Ag 107,868 СЕРЕБРО	<sup>48</sup> Cd 112,41 КАДМИЙ	<sup>49</sup> In 114,82 ИНДИЙ	<sup>50</sup> Sn 118,69 ОЛОВО	<sup>51</sup> Sb 121,75 СУРЬМА
6	VIII	<sup>55</sup> Cs 132,9054 ЦЕЗИЙ	<sup>56</sup> Ba 137,33 БАРИЙ	<sup>57</sup> La* 138,9055 ЛАНТАН	<sup>72</sup> Hf 178,49 ГАФНИЙ	<sup>73</sup> Ta 180,947 ТАНТАЛ
	IX	<sup>79</sup> Au 196,9665 ЗОЛОТО	<sup>80</sup> Hg 200,59 РУТУТЬ	<sup>81</sup> Tl 204,37 ТАЛЛИЙ	<sup>82</sup> Pb 207,2 СВИНЕЦ	<sup>83</sup> Bi 208,9804 ВИСМУТ
7	X	<sup>87</sup> Fr [223] ФРАНЦИЙ	<sup>88</sup> Ra 226,0254 РАДИЙ	<sup>89</sup> Ac** [227] АКТИНИЙ	<sup>104</sup> Ku [260] КУРЧАТОВИЙ	105 [260]

\* Ланта

<sup>58</sup> Ce 140,12 ЦЕРИЙ	<sup>59</sup> Pr 140,9077 ПРАЗЕОДИМ	<sup>60</sup> Nd 144,24 НЕОДИМ	<sup>61</sup> Pm [145] ПРОМЕТИЙ	<sup>62</sup> Sm 150,4 САМАРИЙ	<sup>63</sup> Eu 151,96 ЕВРОПИЙ	<sup>64</sup> Gd 157,25 ГАДОЛИНИЙ
-------------------------------------	---	--------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---

\*\* АКТИ

<sup>90</sup> Th 232,0381 ТОРИЙ	<sup>91</sup> Pa 231,0359 ПРОТАКТИНИЙ	<sup>92</sup> U 238,029 УРАН	<sup>93</sup> Np 237,0482 НЕПУТЧИЙ	<sup>94</sup> Pu [244] ПЛУТОНИЙ	<sup>95</sup> Am [243] АМЕРИЦИЙ	<sup>96</sup> Cm [247] КЮРИЙ
---------------------------------------	---	------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------

	VII		VIII	
	1 H 1,0079 ВОДОРОД	2 He 4,00260 ГЕЛИЙ		
VI				
8 O 15,9994 КИСЛОРОД	9 F 19,998403 ФТОР	10 Ne 20,179 НЕОН		
16 S 32,06 СЕРА	17 Cl 35,453 ХЛОР	18 Ar 39,948 АРГОН		
24 Cr 51,996 ХРОМ	25 Mn 54,9380 МАРГАНЕЦ	26 Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО	27 Co 58,9332 КОБАЛЬТ	28 Ni 58,71 НИКЕЛЬ
34 Se 78,96 СЕЛЕН	35 Br 79,904 БРОМ	36 Kr 83,80 КРИПТОН		
42 Mo 95,94 МОЛИБДЕН	43 Tc 98,9062 ТЕХНЕЦИЙ	44 Ru 101,07 РУТИЛИЙ	45 Rh 102,9055 РОДИЙ	46 Pd 106,4 ПАЛЛАДИЙ
52 Te 127,60 ТЕЛЛУР	53 I 126,9045 ИОД	54 Xe 131,30 КСЕНОН		
74 W 183,85 ВОЛЬФРАМ	75 Re 186,207 РЕЙНИЙ	76 Os 190,2 ОСМИЙ	77 Ir 192,22 ИРИДИЙ	78 Pt 195,09 ПЛАТИНА
84 Po [209] ПОЛОНИЙ	85 At [210] АСТАТ	86 Rn [222] РАДОН	АТОМНЫЕ НОМЕРЫ	
106 [263]			АТОМНАЯ МАССА	
			81 Tl ТАЛЛИЙ 204,37	

НОИДЫ

65 Tb 158,9254 ТЕРБИЙ	66 Dy 162,50 ДИСПРОЗИЙ	67 Ho 164,9304 ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 ЭРБИЙ	69 Tm 168,9342 ТУЛЬИЙ	70 Yb 173,04 ИТТЕРБИЙ	71 Lu 174,967 ЛУТЦИЙ
-----------------------------	------------------------------	------------------------------	--------------------------	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------

НОИДЫ

97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [251] КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНОВИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 (No) [259] НОБЕЛИЙ	103 (Lr) [260] ЛОУРЕНСИЙ
---------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------------	--------------------------------

### 23. Таблица интегралов

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = \begin{cases} 1, & n=0 \\ \sqrt{\pi}/2, & n=1/2 \\ 1, & n=1 \\ 2, & n=2 \end{cases} \quad \int_0^{\infty} x^n e^{-x^2} dx = \begin{cases} \sqrt{\pi}/2, & n=0 \\ 1/2, & n=1 \\ \sqrt{\pi}/4, & n=2 \\ 1/2, & n=3 \end{cases}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x - 1} dx = \begin{cases} 2,31, & n=1/2 \\ \pi^2/6, & n=1 \\ 2,405, & n=2 \\ \pi^4/15, & n=3 \\ 24,9, & n=4 \end{cases} \quad \int_0^{\alpha} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \begin{cases} 0,225, & \alpha=1 \\ 1,18, & \alpha=2 \\ 2,56, & \alpha=3 \\ 4,91, & \alpha=5 \\ 6,43, & \alpha=10 \end{cases}$$

### 24. Некоторые внесистемные единицы

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атм} = \begin{cases} 101,3 \text{ кПа} \\ 760 \text{ мм.рт.ст.} \end{cases}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = \begin{cases} 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 931,5 \text{ МэВ} \end{cases}$$

$$1 \text{ пк} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
<b>Раздел 1. Механика</b>	
1.1. Кинематика .....	4
Движение с постоянной скоростью .....	4
Ускоренное движение .....	6
Движение тел, брошенных под углом к горизонту .....	9
Движение по окружности .....	10
Колебательное движение .....	13
1.2. Динамика материальной точки .....	15
Инерциальные системы отсчета. Законы Ньютона .....	15
Прямолинейное движение материальной точки .....	18
Движение материальной точки по окружности .....	20
Движение системы тел, связанных нерастяжимой нитью .....	22
Движение материальной точки под действием силы, зависящей от скорости .....	23
1.3. Работа, мощность, энергия .....	24
1.4. Динамика поступательного движения системы материальных точек .....	29
Законы сохранения энергии и импульса для системы материальных точек .....	29
Упругие и неупругие столкновения .....	31
Реактивное движение .....	34
1.5. Динамика вращательного движения абсолютно твердого тела .....	35
Момент силы, момент импульса, момент инерции .....	35
Уравнение моментов .....	38
Закон сохранения момента импульса .....	41
Упругие и неупругие соударения твердых тел .....	42
Статика твердого тела .....	44
1.6. Специальная теория относительности .....	45
1.7. Неинерциальные системы отсчета .....	48
1.8. Колебательное движение .....	50
Собственные колебания .....	50
Свободные (затухающие) колебания .....	52
Вынужденные колебания .....	53
1.9. Волновые процессы в упругих средах .....	55
1.10. Гидростатика и гидродинамика .....	57
1.11. Всемирное тяготение .....	63
<b>Раздел 2. Электродинамика</b>	
2.1. Электростатическое поле в вакууме .....	69
Напряженность поля точечного заряда и системы точечных зарядов. Взаимодействие зарядов .....	69

Напряженность поля макроскопических заряженных тел .....	71
Потенциал поля точечного заряда и системы точечных зарядов .....	74
Потенциал поля макроскопических заряженных тел .....	75
Движение заряженных частиц в электростатическом поле .....	78
Собственная электростатическая энергия системы зарядов .....	80
2.2. Проводники в электростатическом поле .....	81
2.3. Диэлектрики в электростатическом поле .....	85
2.4. Электрическая емкость .....	87
2.5. Постоянный электрический ток .....	91
Сила электрического тока, плотность тока. Электрическое сопротивление проводников .....	91
Закон Ома в дифференциальной форме .....	93
Закон Ома в интегральной форме .....	94
Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа .....	97
Работа и мощность постоянного тока .....	100
2.6. Электрический ток в различных средах .....	104
Электрический ток в растворах электролитов .....	104
Электрический ток в вакууме и газах .....	105
2.7. Магнитное поле .....	108
Магнитное поле постоянного тока .....	108
Движение заряженных частиц в магнитном поле .....	112
Индуктивность. Энергия магнитного поля. Магнетики .....	114
Электромагнитная индукция .....	116
2.8. Цепи переменного тока .....	119
2.9. Электромагнитные колебания и волны .....	125
Свободные и вынужденные колебания в контуре .....	125
Электромагнитные волны .....	127

### Раздел 3. Оптика

3.1. Природа света .....	129
3.2. Фотометрия .....	130
Световой поток. Сила света. Освещенность .....	130
Яркость. Светимость .....	133
3.3. Интерференция света .....	134
Временная когерентность .....	134
Интерференционные схемы. Пространственная когерентность .....	135
Интерферометры .....	138
Интерференция в тонких пленках. Полосы равной толщины .....	139
Интерференция в тонких пленках. Полосы равного наклона .....	143
Просветление оптики .....	144
3.4. Дифракция .....	144
Дифракция Френеля .....	144
Дифракция Фраунгофера .....	147
Дифракционная решетка .....	149
Дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки .....	152
3.5. Геометрическая оптика .....	153

Прямолинейность распространения света .....	153
Отражение и преломление света на плоской границе раздела сред..	154
Отражение и преломление света на сферической границе раздела сред. Сферические зеркала и линзы .....	160
3.6. Оптические инструменты.....	167
3.7. Поляризация света .....	174
Поляризация при отражении от диэлектрика. Формулы Френеля. Законы Малюса и Брюстера.....	174
Поляризация при двойном лучепреломлении. Интерференция поляризованного света .....	176
3.8. Рассеяние света. Дисперсия света. Фазовая и групповая скорости ..	180
3.9. Релятивистские эффекты в оптике .....	182
<b>Раздел. 4. Физика атома и атомного ядра</b>	
4.1. Квантовые свойства излучения .....	182
Фотоэффект. Давление света. Эффект Комптона. Тормозное рентгеновское излучение .....	184
Тепловое излучение.....	189
4.2. Модель атома Бора .....	192
4.3. Волновые свойства микрочастиц.....	196
4.4. Квантовая модель атома. Сложные атомы.....	200
4.5. Физика атомного ядра и элементарных частиц.....	203
Радиус, масса, энергия связи ядер.....	203
Радиоактивность .....	205
Ядерные реакции .....	208
<b>Раздел. 5. Молекулярная физика</b>	
5.1. Уравнение состояния идеального газа .....	212
5.2. Элементы статистики идеального газа .....	217
5.3. Первое начало термодинамики .....	222
5.4. Второе начало термодинамики .....	226
5.5. Процессы переноса .....	229
5.6. Реальные газы и жидкости. Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	232
5.7. Поверхностные и капиллярные явления в жидкости .....	235
5.8. Равновесие фаз. Фазовые переходы.....	236
5.9. Тепловые свойства твердых тел .....	239
<b>Ответы</b>	
1. Механика .....	243
2. Электродинамика .....	265
3. Оптика .....	283
4. Физика атома и атомного ядра .....	294
5. Молекулярная физика .....	302
<b>Приложение</b> .....	313

*Учебное издание*

**Сборник вопросов и задач по общей физике**

**Учебное пособие**

**Под редакцией Гершензона Евгения Михайловича**

Редактор *В. А. Обменина*  
Технический редактор *Р. Ю. Волкова*  
Компьютерная верстка: *Е. В. Поляченко*  
Корректор *Э. Г. Юрга*

Подписано в печать с готовых диапозитивов 29.10.2001. Формат 60×90/16.  
Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,5.  
Тираж 30 000 экз. (1-й завод 1 – 5 500 экз.) Заказ № 1108.

Лицензия ИД №02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия».  
117342, г. Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 223. Тел./факс: (095) 330-1092, 334-7873.

Отпечатано на Саратовском полиграфическом комбинате.  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.