

 учебное пособие
для педагогических
ИНСТИТУТОВ

**СБОРНИК
ЗАДАЧ
ПО КУРСУ
ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

ФИЗИЧЕСКИЕ

Нормальное
ускорение свободного падения

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2$$

Гравитационная постоянная

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

Постоянная Авогадро

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Газовая постоянная (молярная)

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

Нормальный (молярный) объём
идеального газа при нормальных
условиях

$$V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$$

Постоянная Больцмана

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Постоянная Фарадея

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$$

Элементарный заряд

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Масса покоя электрона

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = \\ = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$$

Масса покоя протона

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \\ = 1,00728 \text{ а.е.м.}$$

ПОСТОЯННЫЕ

Масса покоя нейтрона

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \\ = 1,00866 \text{ а.е.м.}$$

Отношение заряда электрона
к его массе

$$\frac{e}{m_e} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

Скорость света в вакууме

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Постоянная Стефана-Больцмана

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Постоянная Планка

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Постоянная Ридберга

$$R = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

Радиус первой боровской орбиты

$$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

Комптоновская длина волны
электрона

$$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Магнетон Бора

$$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$$

Атомная единица массы

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Коэффициент пропорциональности
между массой и энергией

$$c^2 = 8,99 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг}$$

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

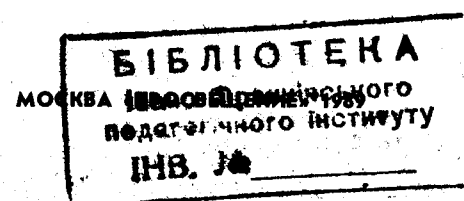
Под редакцией М. С. Цедрика

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебного пособия
для студентов педагогических институтов
по специальности № 2105 «Физика»

НБ ПНУС



bn13456



Авторы:

Г. А. Загуста, Г. П. Макеева, А. С. Микулич,
И. Ф. Савицкая, М. С. Цедрик

Рецензенты: кафедра физики Архангельского государственного педагогического института им. М. В. Ломоносова (зав. кафедрой доцент А. Н. Суровцев); профессор кафедры общей физики МИФИ И. Е. Иродов.

Сборник задач по курсу общей физики: Учеб. пособие
С23 для студентов пед. ин-тов по спец. № 2105 «Физика»
/Г. А. Загуста, Г. П. Макеева, А. С. Микулич и др.;
Под ред. М. С. Цедрика. — М.: Просвещение, 1989. — 271 с.:
ил.

ISBN 5-09-000627-X

Учебное пособие содержит краткое изложение основных теоретических положений, задачи по всем разделам курса общей физики, ответы и предложения, которыми можно воспользоваться при решении задач.

ББК 22.3

С $\frac{4309000000-361}{103(03)-89}$ 30—88

ISBN 5-09-000627-X

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из факторов, обеспечивающих улучшение качества подготовки учителей физики средних общеобразовательных школ, является усвоение студентами педагогических вузов теоретических знаний по физике и умение применять их в практических упражнениях. Развитию практических навыков способствует решение задач. Навыки, полученные студентами при решении задач настоящего «Сборника», будут полезны в их дальнейшей педагогической деятельности.

Предлагаемый «Сборник» содержит задачи по всем разделам курса общей физики в соответствии с действующей программой. В начале каждого параграфа даны краткие теоретические сведения с указанием основных законов и формул, которые используются при решении задач. В конце «Сборника» помещены ответы к задачам, решения наиболее сложных задач, а также все необходимые справочные сведения.

Труд между авторами «Сборника» распределен следующим образом: §§ 1—6, 8—10, 21—23 составил А. С. Микулич; §§ 11—16 — И. Ф. Савицкая; §§ 17—20 — Г. А. Загуста; §§ 24—30 — Г. П. Макеева; §§ 7, 31—36, предисловие и приложения — М. С. Цедрик.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору кафедры общей физики МИФИ И. Е. Иродову, коллективу кафедры физики Архангельского педагогического института им. М. В. Ломоносова, возглавляемой доцентом А. Н. Суровцевым, сотрудникам кафедры общей физики Минского педагогического института им. А. М. Горького, доценту МГПИ им. В. И. Ленина Ю. Н. Пашину, взявшим на себя труд по рецензированию рукописи. Их критические замечания учтены при окончательной доработке рукописи и во многом способствовали улучшению ее качества.

Глава I

МЕХАНИКА

§ 1. КИНЕМАТИКА

Средняя скорость точки:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{r}$ — приращение радиус-вектора $\vec{r}(t) = \vec{i}x(t) + \vec{j}y(t) + \vec{k}z(t)$ за время Δt ($\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы (орты) осей прямоугольной системы координат, $x(t), y(t), z(t)$ — координаты точки).

Мгновенная скорость:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Модуль скорости:

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \frac{ds}{dt},$$

где ds — путь, пройденный точкой за время dt .

Закон сложения скоростей Галилея:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0,$$

где \vec{v} — скорость материальной точки в условно неподвижной системе координат (абсолютная скорость), \vec{v}' — ее скорость в движущейся системе координат (относительная скорость), \vec{v}_0 — скорость подвижной системы координат относительно неподвижной (переносная скорость).

Среднее ускорение точки:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{v}$ — приращение скорости за время Δt .

Мгновенное ускорение:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Модуль ускорения:

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Полное ускорение при криволинейном движении:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau = \vec{n} \frac{v^2}{R} + \vec{\tau} \frac{dv}{dt},$$

где \vec{a}_n и \vec{a}_τ — нормальное и тангенциальное ускорения, \vec{n} и $\vec{\tau}$ — единичные векторы в направлении главной нормали и касательной к траектории, R — радиус кривизны траектории.

Направление вектора полного ускорения определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_n}{a_\tau},$$

где α — угол между векторами полного ускорения и скорости.

Угловая скорость и угловое ускорение при вращательном движении:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \quad \vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Связь линейной и угловой скорости:

$$\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{r}],$$

где \vec{r} — радиус-вектор рассматриваемой точки относительно любой точки оси вращения.

Связь угловой скорости с периодом T и частотой вращения n :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Нормальное и тангенциальное ускорения точки равномерно вращающегося тела:

$$a_n = \omega^2 R, \quad a_\tau = \varepsilon R,$$

где R — расстояние от оси вращения.

Уравнение гармонических колебаний и его решение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0, \quad x = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где x — смещение, A — амплитуда, ω_0 — собственная частота колебаний, φ — начальная фаза.

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний одной и той же частоты

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

амплитуда и фаза сложного колебания определяется соотношениями:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Частота биений при сложении гармонических колебаний с частотами ν_1 и ν_2 :

$$\nu = |\nu_1 - \nu_2|.$$

Прямолинейное движение

1.1. В каком случае пройденный материальной точкой путь и модуль вектора перемещения совпадают?

1.2. Координаты материальной точки изменяются со временем по закону $x=4t$, $y=3t$, $z=0$ ¹. Найти зависимость пройденного точкой пути от времени, отсчитывая расстояние от начального ее положения. Какой путь пройдет точка за 5 с?

1.3. Первую четверть пути мотоциклист проехал со скоростью $v_1=10$ м/с, вторую со скоростью $v_2=15$ м/с, третью со скоростью $v_3=20$ м/с и последнюю со скоростью $v_4=5,0$ м/с. Определить среднюю скорость мотоциклиста на всем пути.

1.4. Найти среднюю скорость движения автомобиля, если известно, что $\frac{1}{4}$ часть времени он двигался со скоростью 16 м/с, а все остальное время со скоростью 8 м/с.

1.5. Пассажир электропоезда, движущегося со скоростью 15 м/с, заметил, что встречный поезд длиной 210 м прошел мимо него за 6,0 с. Определить скорость встречного поезда.

1.6. Определить скорости велосипедиста и пешехода, если известно, что при движении их в одном направлении за каждую минуту движения пешеход отстает от велосипедиста на расстояние $s_1=210$ м, а если, не меняя по модулю скорости, они движутся навстречу друг другу, то за каждые 2 мин расстояние между ними уменьшается на $s_2=780$ м.

1.7. При неподвижном эскалаторе метрополитена пассажир поднимается за $t_1=120$ с, а по движущемуся при той же скорости относительно ступенек за $t_2=30$ с. Определить время подъема пассажира, неподвижно стоящего на движущемся эскалаторе.

1.8. Моторная лодка плывет по реке из одного пункта в другой и обратно. Во сколько раз время движения лодки против течения больше времени движения по течению, если скорость течения $v_1=2,0$ м/с, а скорость лодки относительно воды $v_2=10$ м/с?

1.9. Определить скорость моторной лодки относительно воды, если при движении по течению реки ее скорость 10 м/с, а при движении против течения 6,0 м/с. Чему равна скорость течения воды в реке?

1.10. Определить продолжительность полета самолета между двумя пунктами, расположенными на расстоянии 1000 км, если скорость встречного ветра $v_1=25$ м/с, а средняя скорость самолета относительно воздуха $v_2=250$ м/с. Чему равно время полета самолета при попутном ветре?

1.11. Определить скорость встречного ветра, если при движении автобуса со скоростью $v_1=15$ м/с капли дождя, имеющие вертикальную составляющую скорости $v_2=10$ м/с, образуют на оконном стекле автобуса полосы под углом $\alpha=30^\circ$.

1.12. Определить время полета самолета между двумя пунктами, находящимися на расстоянии 500 км, если скорость самолета относительно воздуха $v_1=100$ м/с, а скорость встречного ветра, направленного под углом $\alpha=30^\circ$ к направлению движения, $v_2=30$ м/с.

1.13. С какой наибольшей скоростью должен идти под дождем человек, чтобы дождь не попадал на ноги, если он держит зонт на высоте 2,0 м и край зонта выступает вперед на 0,30 м? Капли дождя падают вертикально со скоростью 8,0 м/с.

1.14. Турбореактивный самолет за 1,5 ч полета преодолел расстояние 700 км. Определить скорость ветра, если его направление составляет угол $\alpha=90^\circ$ с направлением движения самолета, скорость которого относительно воздуха 200 м/с.

1.15. Две подводные лодки плывут навстречу друг другу каждая со скоростью u . С первой лодки был послан ультразвуковой сигнал, который, отразившись от второй лодки, вернулся обратно через время t . Скорость сигнала c . На каком расстоянии находились лодки в тот момент, когда был послан сигнал?

1.16. Два лодочника должны переплыть реку из пункта А в пункт В (рис. 1.1). Один из них направляет лодку по прямой АВ и, достигнув противоположного берега, оказывается в пункте С. Для того чтобы попасть в пункт В, он движется против течения вдоль берега от пункта С к пункту В. Второй лодочник направляет лодку так, что, достигнув противоположного берега, сразу оказывается в пункте В. Какой из них попал в пункт В быстрее и во сколько раз, если скорость лодки относительно воды в обоих случаях одинакова и равна $v_1=2,0$ м/с, а скорость течения воды $v_2=1,2$ м/с? Скорость течения воды у берегов и в середине реки считать одинаковой.

1.17. Движение материальной точки задано уравнением $x=at+bt^2+ct^3$, где $a=5,0$ м/с, $b=0,20$ м/с², $c=0,10$ м/с³. Определить скорость точки в моменты времени $t_1=2,0$ с и $t_2=4,0$ с, а также среднюю скорость в интервале времени от t_1 до t_2 .

1.18. Определить траекторию движения точки, заданного уравнениями: $x=4t^2+2$; $y=6t^2-3$; $z=0$. Построить график зависимости пути, пройденного точкой, от времени.

1.19. Движение материальной точки задано уравнениями: $x=8t^2+4$; $y=6t^2-3$; $z=0$. Определить модули скорости и ускорения точки в момент времени $t=10$ с.

1.20. Какой путь пройдет тело за время $t=10$ с от начала движения, если уравнения его движения $x=2t^2+3t+4$, $y=3t^2+4t-2$, $z=0$?

1.21. На рисунке 1.2 приведены графики скоростей двух тел А и В, движущихся прямолинейно, координаты которых в на-

¹ Здесь и далее в уравнениях движения величины выражены в единицах СИ.

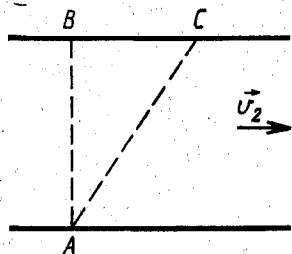


Рис. 1.1

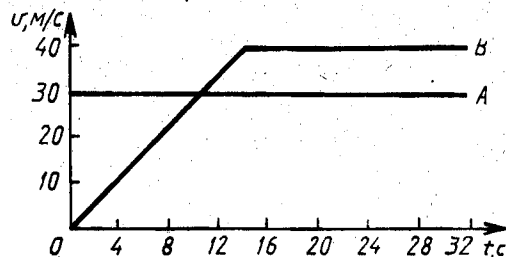


Рис. 1.2

чальный момент времени $t=0$ совпадают. Через какое время их перемещения совпадут?

1.22. Прямолинейное движение точки описывается уравнением $\vec{r} = 3t^2\vec{i} + 4t^2\vec{j} + 8t\vec{k}$. Найти путь, пройденный точкой за первые 4 с движения.

1.23. Скорость материальной точки, движущейся вдоль оси X, определяется уравнением $v_x = 0,2 - 0,1t$. Найти координату точки в момент времени $t=10$ с, если в начальный момент времени она находилась в точке $x_0=1$.

1.24. На рисунке 1.3 приведён график зависимости вертикальной проекции скорости движения кабины лифта от времени. Определить перемещение кабины и пройденный ею путь. Построить график зависимости ускорения кабины от времени.

1.25. Самолет для взлета должен иметь скорость 100 м/с. Определить время разбега и ускорение, если длина разбега 600 м; движение самолета при этом считать равноускоренным.

1.26. Автомобиль движется со скоростью $v_1=25$ м/с. На пути $s=40$ м производится торможение, после чего скорость уменьшается до $v_2=15$ м/с. Считая движение автомобиля равнозамедленным, найти модуль ускорения и время торможения.

1.27. Тело, совершающее равноускоренное движение, проходит одинаковые соприкасающиеся отрезки пути длиной $s=15$ м соответственно за $t_1=2,0$ с и $t_2=1,0$ с. Определить модули ускорения и скорости тела в начале первого отрезка пути.

1.28. Определить путь, проходимый частицей, которая движется по прямолинейной траектории в течение 10 с, если ее скорость изменяется по закону $v=30+2t$. В момент времени $t_0=0$ $s=0$.

1.29. В копре для забивки свай груз равномерно поднимается на высоту 4,9 м за 5 с, после чего сразу падает на сваю. Определить, сколько ударов делает груз за 1 мин.

1.30. Определить время подъема лифта в высотном здании, считая его движение при разгоне и торможении равнопеременным с ускорением $a=1,0$ м/с², а на среднем участке — равномерным со скоростью $v=2,0$ м/с. Высота подъема $h=60$ м.

1.31. Определить начальную скорость тела, брошенного вер-

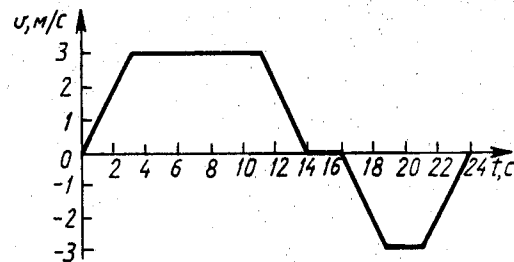


Рис. 1.3

тикально вверх, если отметку (высоту) 60 м оно проходило 2 раза с промежутком времени 4,0 с. Сопротивление воздуха не учитывать.

1.32. Тело, брошенное вертикально вниз с начальной скоростью 19,6 м/с, за последнюю секунду прошло $n=\frac{1}{4}$ часть всего пути. Определить время падения тела и его конечную скорость. С какой высоты брошено тело?

1.33. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 21 м/с. Определить время между двумя моментами прохождения телом отметки половины максимальной высоты. Сопротивление воздуха не учитывать.

1.34. На вертикально подвешенной тонкой нити закреплено n свинцовых шариков так, что нижний шарик почти касается пола. Когда верхний конец нити отпускается, шарик один за другим ударяются о пол. Как должны относиться расстояния между шариками и расстояния от шариков до пола, чтобы удары слышались через равные промежутки времени?

1.35. Определить начальную скорость, которую необходимо сообщить телу, брошенному вертикально вверх, чтобы оно вернулось обратно через $t=6$ с. Чему равна максимальная высота подъема? Сопротивление воздуха не учитывать.

1.36. Частица движется с ускорением $\vec{a} = 2t\vec{i} + 4t\vec{j} + 3\vec{k}$. Определить модуль скорости частицы в момент времени $t=2$ с, если в начальный момент времени $t=0$ ее скорость была $\vec{v}_0 = 3\vec{i} + 1\vec{j} - 1\vec{k}$.

1.37. На наклонной плоскости с углом наклона $\alpha=30^\circ$ лежит тело. Какое минимальное ускорение необходимо сообщить наклонной плоскости в горизонтальном направлении, чтобы лежащее на ней тело свободно падало?

Криволинейное движение

1.38. Какова траектория точки, если ее радиус-вектор относительно начала координат изменяется со временем по закону $\vec{r} = 2t\vec{i} + 8t^2\vec{j}$?

1.39. Радиус-вектор частицы определяется выражением $\vec{r} =$

$= 3ti + 0,5t^2j$. Определить модули скорости и ускорения частицы в момент $t = 5$ с.

1.40. Определить скорость пули, если при выстреле из пистолета в горизонтальном направлении во втором из двух вертикально закрепленных тонких листов бумаги, находящихся на расстоянии $l = 20$ м, пробойна оказалась на $h = 5$ см ниже, чем в первом.

1.41. Ракета запущена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту с начальной скоростью $v_0 = 90,4$ м/с. Определить время горения запала ракеты, если известно, что она вспыхнула в наивысшей точке своей траектории.

1.42. Под каким углом к горизонту нужно направить струю воды, чтобы высота ее подъема была равна расстоянию, на которое бьет струя воды?

† 1.43. Доказать, что при отсутствии сопротивления воздуха максимальная дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту, будет при $\alpha = 45^\circ$.

† 1.44. Под каким углом к горизонту брошено тело, если известно, что максимальная высота подъема равна $1/4$ части дальности полета? Сопротивление воздуха не учитывать.

1.45. С башни высотой 19,6 м в горизонтальном направлении брошено тело со скоростью 10 м/с. Записать уравнение траектории тела. Чему равна скорость тела в момент падения? Какой угол образует эта скорость с горизонтальным направлением? Сопротивлением воздуха пренебречь.

1.46. Из одной точки одновременно брошены два тела с одинаковой скоростью под разными углами α_1 и α_2 к горизонту. Определить расстояние между телами спустя $t = 2,0$ с после начала движения, если $v_0 = 10$ м/с, а $\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 60^\circ$.

1.47. На какой высоте вектор скорости тела, брошенного под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту с начальной скоростью $v_0 = 20$ м/с, будет составлять с горизонтом угол $\beta = 30^\circ$? Сопротивление воздуха не учитывать.

1.48. Через какое время вектор скорости тела, брошенного под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту с начальной скоростью 20 м/с, будет составлять с горизонтом угол $\beta = 30^\circ$? Сопротивление воздуха не учитывать.

† 1.49. С вершины горы брошено тело в горизонтальном направлении со скоростью 19,6 м/с. Определить тангенциальное и нормальное ускорения тела спустя 2,0 с после начала движения. Какой угол образует вектор полного ускорения с вектором скорости?

1.50. Материальная точка совершает движение в плоскости XY, описываемое уравнениями $x = 3 \sin \omega t$, $y = 3 \cos \omega t$. Записать уравнение траектории точки. Найти зависимость пройденного точкой пути от времени, считая, что при $t = 0$ $s = 0$.

† 1.51. Материальная точка движется в плоскости XY. Определить траекторию точки, если ее движение задано уравнениями:

$$x = 3 \sin \omega t, \quad y = 2 \cos \omega t.$$

1.52. Определить среднюю скорость движения самолета, если известно, что он вылетел из Хабаровска в 6 ч по местному времени и прибыл в Москву в 6 ч по московскому времени. Считать, что Москва и Хабаровск находятся на широте 50° .

1.53. На горизонтальном валу, совершающем 200 об/с, на расстоянии 20 см друг от друга закреплены два тонких диска. Для определения скорости полета пули произведен выстрел так, что пуля пробита оба диска на одинаковом расстоянии от оси вращения. Определить скорость пули, если угловое смещение пробоин оказалось равным 18° .

1.54. При повороте трактора, движущегося со скоростью 24 км/ч, его центр масс описывает дугу радиуса $R = 9,0$ м. Найти разность скоростей гусениц трактора, если расстояние между ними $d = 1,5$ м.

1.55. На тележке, движущейся по ровной площадке вдоль оси X со скоростью $v_{ox} = 5,0$ м/с, установлен двигатель, на вал которого насажен диск диаметром $D = 20$ см, совершающий $n = 13$ об/с. Направление вращения диска таково, что линейная скорость любой точки в момент прохождения ею крайнего нижнего положения совпадает с направлением оси X. Как будет двигаться диск, если он сорвется с вала? Считать, что при качении диска по площадке скольжение отсутствует. Трение не учитывать.

1.56. С какой скоростью двигалась повозка при киносъемке, если при демонстрации кинофильма на экране задние колеса, имеющие по $N = 12$ спиц, кажутся невращающимися? Диаметр колес $D = 1,0$ м. Киносъемка производилась со скоростью $v_1 = 24$ кадра в секунду.

1.57. Сколько оборотов сделали колеса автомобиля после включения тормоза до полной остановки, если в момент начала торможения автомобиль имел скорость $v_0 = 60$ км/ч и остановился за $t = 3,0$ с после начала торможения? Диаметр колес $D = 0,70$ м. Чему равно среднее угловое ускорение колес при торможении?

1.58. Скорость электропоезда 36 км/ч. Определить скорость точки A на ободе колеса электропоезда (рис. 1.4) по отношению к рельсу в момент, когда она находится в наивысшем положении, в наивысшем положении и на уровне оси колеса. Радиус колеса 0,50 м. Точка A ниже уровня рельса на 5,0 см. Чему равна угловая скорость вращения колеса?

1.59. Определить угловое ускорение маховика, частота вращения которого за время $N = 20$ полных оборотов возросла равномерно от $n_0 = 1,0$ об/с до $n = 5,0$ об/с.

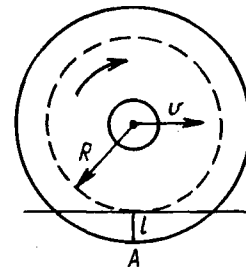


Рис. 1.4

1.60. За время движения в канале ствола пуля делает один полный оборот. Какова средняя угловая скорость вращения пули, если в момент вылета скорость ее $v=860$ м/с, а длина ствола $l=1,0$ м? Чему равно среднее угловое ускорение пули?

1.61. Определить угловую скорость и угловое ускорение твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси Z по закону $\varphi=at-bt^2$, где $a=20$ с⁻¹, $b=1$ с⁻². Каков характер движения этого тела? Построить графики зависимости угловой скорости и углового ускорения от времени.

Колебательное движение

1.62. Амплитуда гармонического колебания равна 5,0 см, период — 4,0 с. Определить максимальные скорость и ускорение колеблющейся точки, если в начальный момент времени точка находилась в положении максимального смещения.

1.63. Через какое время от начала движения точка, совершающая гармонические колебания с периодом 12 с и начальной фазой, равной 0, сместится от положения равновесия на расстояние, которое равно половине амплитуды?

1.64. Написать уравнение колебательного движения материальной точки, совершающей колебание с амплитудой 5 см, периодом 2 с и начальной фазой 45°.

1.65. Колебания материальной точки описываются уравнением $x=0,03 \sin \pi (t+0,5)$. Определить наибольшие значения скорости и ускорения. Чему равна фаза колебаний спустя 5,0 с от начала движения?

1.66. Определить начальную фазу гармонического колебания тела, если через 0,25 с от начала движения смещение, изменяющееся по закону синуса, было равно половине амплитуды. Период колебания 6,0 с.

1.67. Считая движение поршня в цилиндре автомобильного двигателя гармоническим колебанием, определить максимальные значения его скорости и ускорения, если автомобиль движется со скоростью $v=72$ км/ч на прямой передаче, радиус колес $R=344$ мм, ход поршня $l=100$ мм.

1.68. Написать уравнение колебательного движения материальной точки, совершающей два одинаково направленных гармонических колебания, которые описываются уравнениями:

$$x_1 = 4 \sin 2\pi \left(t + \frac{1}{3}\right); y = 3 \sin \left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right).$$

1.69. Какова частота изменения амплитуды сложного колебания, полученного в результате сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с частотами 440 и 440,5 Гц?

1.70. Найти уравнение траектории движения материальной точки, которая участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, заданных уравнениями:

$$x = 2 \sin \pi(2t + 1), y = 2 \sin (2\pi t + 90^\circ).$$

Указать направление движения.

1.71. Сложить графически два взаимно перпендикулярных колебания с одинаковыми амплитудами и фазами, периоды которых соответственно равны 1 и 2 с.

§ 2. ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Основное уравнение динамики (второй закон Ньютона):

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F},$$

где $\vec{p} = m\vec{v}$ — импульс частицы, m — ее масса, \vec{v} — скорость.

Импульс системы равен сумме импульсов ее отдельных частиц:

$$\vec{p} = \sum \vec{p}_i.$$

Поступательное движение системы частиц как целого можно характеризовать движением одной точки — центра масс системы:

$$m \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{F},$$

где $m = \sum m_i$ — суммарная масса всех частиц рассматриваемой системы, $\vec{F} = \sum \vec{F}_i$ — результирующая всех внешних сил, \vec{v}_c — скорость движения центра масс.

Радиус-вектор, определяющий положение центра масс системы частиц в пространстве относительно произвольной точки 0:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i},$$

где m_i — масса i -частицы, \vec{r}_i — ее радиус-вектор с началом в точке 0.

Уравнение движения тела переменной массы:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{u} \frac{dm}{dt} + \vec{F},$$

где \vec{u} — скорость отделяемого (присоединяемого) вещества относительно движущегося тела.

Скорость ракеты (формула Циолковского):

$$v = u \ln \frac{M_0}{M},$$

где u — скорость частиц относительно ракеты, M_0 и M — начальная и текущая массы ракеты.

Сила трения скольжения:

$$F = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения, N — сила нормального давления.

2.1. Под действием некоторой силы тело массой $m=3$ кг совершает прямолинейное движение, описываемое уравнением $x=2t^3-3t^2+5t+4$. Чему равна действующая на тело сила в момент времени $t=5$ с? Построить график зависимости силы от времени.

2.2. Какова скорость пули при вылете из духового ружья, если ее масса $m=2,5$ г, длина ствола $l=0,70$ м, калибр $D=5,0$ мм, а среднее давление воздуха во время выстрела $p=9,8$ МПа?

2.3. Вагон массой 10^4 кг отцепился от движущегося состава и, двигаясь равнозамедленно, за 20 с прошел путь 20 м, после чего остановился. Найти силу трения, коэффициент трения и начальную скорость вагона.

2.4. По скользкой дороге обычно идут, делая маленькие шаги. С какой шириной шага может идти человек, не боясь упасть, если длина его ног равна 1 м, а коэффициент трения подошвы обуви о дорогу 0,1?

2.5. Автомобиль движется вверх по наклонной дороге со скоростью $v=10$ м/с. Определить путь, пройденный автомобилем до остановки, и время его движения, если коэффициент трения $\mu=0,5$, а угол наклона $\alpha=10^\circ$.

2.6. Определить коэффициент трения между наклонной плоскостью и движущимся по ней телом, если известно, что это тело, имея начальную скорость $v_0=5,0$ м/с и двигаясь вверх по наклонной плоскости, проходит путь $s=2,0$ м. Угол наклона плоскости $\alpha=30^\circ$.

2.7. Тело, которому сообщена начальная скорость, параллельная наклонной плоскости, поднимается по наклонной плоскости и затем опускается. В каком случае при подъеме или при спуске и во сколько раз время движения тела больше, если оно вернулось в первоначальное положение? Будет ли конечная скорость при спуске равна начальной скорости при подъеме? Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью $\mu=0,20$. Угол наклона плоскости $\alpha=45^\circ$.

2.8. Чему равен коэффициент трения колес автомобиля о дорогу, если при скорости автомобиля $v=10$ м/с тормозной путь равен $s=8,0$ м?

2.9. На тележке массой $m_1=20$ кг лежит груз массой $m_2=5,0$ кг. К грузу приложена сила F , сообщающая тележке с грузом ускорение a . Сила действует под углом 30° к горизонту. Каково максимальное значение этой силы, при котором груз не будет скользить по тележке? Коэффициент трения между грузом и тележкой $\mu=0,20$. Трением между тележкой и дорогой пренебречь. С каким ускорением будет двигаться тележка под действием силы F ?

2.10. Через неподвижный блок перекинута тонкая нерастяжимая нить, на концах которой подвешены два груза массами $m_1=200$ г и $m_2=300$ г. Какой путь пройдет каждый из грузов за 1 с? Считать, что блок вращается без трения. Массой блока пренебречь.

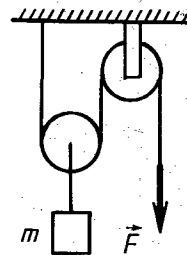


Рис. 2.1

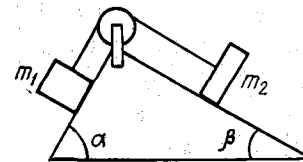


Рис. 2.2

2.11. Груз массой $m=10$ кг поднимается вверх с помощью системы подвижного и неподвижного блоков (рис. 2.1). Определить ускорение груза, если к концу нити, перекинутой через неподвижный блок, приложена сила $F=60$ Н. Массой нити и блоков пренебречь.

2.12. Однородный стержень длиной $L=5,0$ м поднимается вертикально вверх под действием силы $F=500$ Н, приложенной к одному из его концов. С какой силой растянут стержень в сечении, находящемся на расстоянии $l=1,0$ м от его нижнего конца?

2.13. Тело массой m лежит на наклонной плоскости с углом наклона $\alpha=30^\circ$. Какой путь пройдет тело по наклонной плоскости за $t=1,0$ с, если наклонной плоскости сообщить ускорение $a=3,8$ м/с², направленное вертикально вниз? Коэффициент трения считать равным $\mu=0,20$.

2.14. Два груза массами $m_1=4,0$ кг и $m_2=1,0$ кг связаны нитью, перекинутой через блок, который прикреплен к призме (рис. 2.2), и могут скользить по граням этой призмы. Найти ускорение грузов, если $\alpha=60^\circ$, $\beta=30^\circ$, а коэффициент трения $\mu=0,20$. Исследовать возможные случаи.

2.15. Какое наибольшее ускорение может развить автомобиль при движении вверх по наклонной дороге с углом наклона $\alpha=20^\circ$, если коэффициент трения колес о покрытие дороги $\mu=0,5$? Какой путь пройдет автомобиль за $t=10$ с, если в момент начала подъема скорость его $v_0=10$ м/с?

2.16. На горизонтальной поверхности лежит тело массой 5,0 кг. Какой путь пройдет это тело за $t=1,0$ с, если к нему приложить силу $F=50$ Н, образующую угол $\alpha=60^\circ$ с горизонтом? Коэффициент трения между телом и поверхностью $\mu=0,20$.

2.17. С каким ускорением будет двигаться тело массой $m=2,0$ кг в горизонтальном направлении, если к нему приложена сила $F=5,0$ Н, направленная под углом $\alpha=45^\circ$ к горизонту? Коэффициент трения $\mu=0,10$.

2.18. Однородная тяжелая гибкая нить длиной l лежит на наклонной плоскости призмы, расположенной под углом α к горизонту, а один конец нити свисает вдоль вертикальной грани призмы. При какой наименьшей длине свисающей части нить начнет скользить, сползая с призмы, если коэффициент трения μ ?

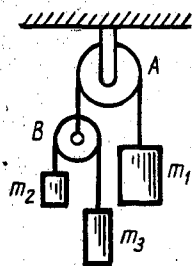


Рис. 2.3

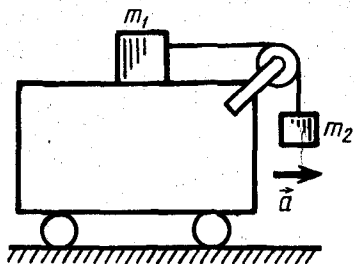


Рис. 2.4

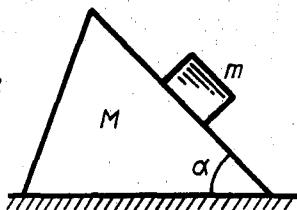


Рис. 2.5

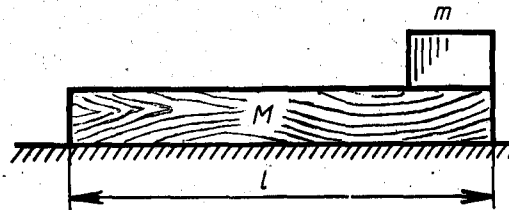


Рис. 2.6

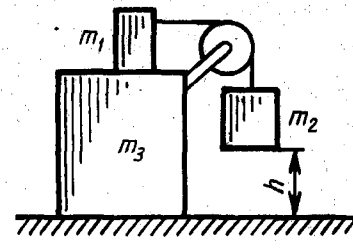


Рис. 2.7

2.19. Однородная цепь лежит на горизонтальной поверхности стола, и при этом один ее конец свисает со стола. Определить коэффициент трения, если известно, что цепь начинает соскальзывать со стола, когда длина свисающего конца составляет $1/6$ часть общей длины цепи.

2.20. К динамометру, подвешенному в кабине лифта, прикреплен груз массой $5,0$ кг. Лифт движется вверх. Определить ускорение лифта, считая его одинаковым по модулю при разгоне и торможении, если известно, что во время разгона показание динамометра больше, чем при торможении, на 15 Н.

2.21. К потолку кабины лифта прикреплен динамометр, на котором подвешен блок. Через блок перекинут нерастяжимый шнур, к концам которого привязаны грузы массами $m_1 = 1,0$ кг и $m_2 = 2,0$ кг. Каково будет показание динамометра при движении грузов, если лифт неподвижен или движется вверх с ускорением $3,0$ м/с²? Массой блока и шнура пренебречь.

2.22. Через неподвижный блок A перекинута нить, на одном конце которой подвешен груз массой $m_1 = 3,0$ кг, а на другом конце второй блок B. Через блок B также перекинута нить, на концах которой подвешены грузы массами $m_2 = 1,0$ кг и $m_3 = 2,0$ кг (рис. 2.3). С каким ускорением будет двигаться блок B, если всю систему предоставить самой себе? Массу блоков и нитей не учитывать. Исследовать возможные случаи.

2.23. На горизонтальной поверхности тележки лежит груз массой $m_1 = 2,0$ кг, связанный с другим грузом массой $m_2 = 1,0$ кг с помощью тонкой нерастяжимой нити, которая перекинута через неподвижный блок, укрепленный на тележке (рис. 2.4). С каким наибольшим ускорением нужно двигать тележку вправо, чтобы грузы находились в покое относительно нее? Коэффициент трения обоих грузов о поверхность тележки $\mu = 0,1$.

2.24. Бак с водой стоит на наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$. С каким направленным горизонтально ускорением должна двигаться наклонная плоскость, чтобы поверхность воды в баке была параллельна ей?

2.25. На тележке, движущейся в горизонтальном направлении с ускорением $a = 9,8$ м/с², установлен отвес. Найти натяжение нити отвеса и угол, который образует нить с вертикалью, если масса подвешенного на нити груза $m = 0,10$ кг.

2.26. Тело массой $m = 1,0$ кг скользит по боковой поверхности клина массой $M = 2,0$ кг, лежащего на гладкой горизонтальной поверхности стола. Боковые грани клина образуют угол $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2.5). С каким ускорением будет двигаться клин по столу, если трение между телом и клином, а также между клином и столом отсутствует?

2.27. На конце доски длиной l и массой M , лежащей на гладкой поверхности стола, находится короткий брусок массой m (рис. 2.6). Какую скорость v необходимо сообщить толчком доске, чтобы она выскользнула из-под бруска? Коэффициент трения скольжения бруска по поверхности доски μ . Трение доски о поверхность стола не учитывать.

2.28. Через неподвижный блок перекинута тонкая нерастяжимая нить, на концах которой подвешены грузы массами $m_1 = 1,0$ кг и $m_2 = 2,0$ кг. В начальный момент времени оба груза находились на одной высоте. Определить, на какое расстояние сместится центр масс грузов через $t = 1,0$ с от начала движения. Считать, что трения нет, а массы блока и нити пренебрежимо малы. Найти ускорение центра масс грузов.

2.29. На какое расстояние сместится неподвижно стоящая на воде лодка, если человек массой $m_1 = 70$ кг пройдет с носа лодки на корму? Длина лодки $2,5$ м, ее масса $m_2 = 100$ кг. Сопротивлением воды пренебречь.

2.30. Кубики массами $m_1 = 0,1$ кг, $m_2 = 0,2$ кг и $m_3 = 0,3$ кг расположены на гладкой горизонтальной поверхности стола (рис. 2.7). Кубик массой m_2 удерживается на высоте $h = 30$ см над поверхностью стола. Если его освободить, то система придет в движение. На какое расстояние переместится кубик массой m_3 к тому моменту, когда кубик массой m_2 коснется поверхности стола? Коэффициент трения между кубиками равен μ . Трения в блоке нет, массы блока и нити пренебрежимо малы.

2.31. Ракета с жидким топливом массой $M = 15 \cdot 10^3$ кг запускается в вертикальном направлении. Расход топлива $Q = 150$ кг/с. На какую высоту поднимется ракета за время работы двигателя $t = 1$ мин, если скорость истечения газов из сопла $u = 3,0$ км/с?

2.32. Какую массу газов каждую секунду должна выбрасывать ракета с начальной массой M_0 направленная вертикально вверх,

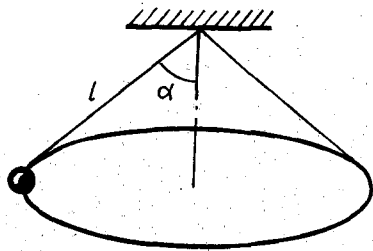


Рис. 2.8

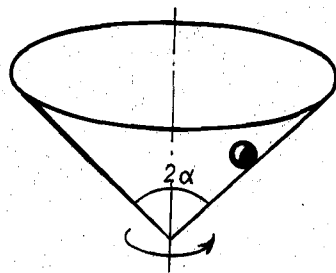


Рис. 2.9

чтобы через некоторое время от начала движения она могла оставаться неподвижной в поле тяжести? Скорость газовой струи относительно ракеты u . Изменение ускорения силы тяжести с высотой не учитывать.

2.33. Платформа нагружена песком, который высыпается через отверстия в дне с постоянной скоростью $Q=10$ кг/с. Найти скорость платформы через время $t=2$ мин от начала движения, если при $t=0$ скорость $v_0=0$, масса платформы $M=20 \cdot 10^3$ кг и на нее начала действовать постоянная сила тяги $F=1000$ Н. Трение не учитывать.

2.34. Горизонтально расположенный диск вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр. На диске лежит груз на расстоянии $R=10$ см от оси вращения. Найти коэффициент трения покоя между диском и грузом, если при частоте вращения диска $n=0,5$ об/с груз начинает скользить по поверхности диска.

2.35. Определить максимальное значение скорости, с которой автомобиль может двигаться по закруглению асфальтированного шоссе радиусом $R=100$ м, если коэффициент трения между шинами автомобиля и асфальтом $\mu=0,60$.

2.36. При какой скорости автомобиля давление, оказываемое им на вогнутый мост, в 2 раза больше давления на выпуклый мост? Радиус кривизны мостов в обоих случаях $R=30$ м.

2.37. Определить период обращения конического маятника (рис. 2.8), если его длина $l=49$ см, а угол, образуемый нитью с вертикалью, $\alpha=60^\circ$.

2.38. Тело массой $m=200$ г подвешено на нити длиной $l=80$ см. Его отклонили от положения равновесия до высоты точки подвеса и отпустили, в результате чего нить оборвалась. На какой высоте находилось тело в момент разрыва нити, если она разрывается под действием силы $F=4,0$ Н?

2.39. Сосуд с водой, подвешенный на веревке длиной $l=1$ м, вращается в вертикальной плоскости так, что вода из него не выливается. Определить максимальное значение периода обращения.

2.40. Внутри вертикально расположенного конуса с углом при вершине $2\alpha=90^\circ$ находится тело (рис. 2.9). На каком ми-

нимальном расстоянии от вершины конуса может находиться тело, если коэффициент трения между телом и поверхностью конуса $\mu=0,20$, а конус вращается вокруг своей оси с угловой скоростью $\omega=7,0$ рад/с? Чему равно максимальное значение этого расстояния?

§ 3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ, ИМПУЛЬСА И МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Элементарная работа силы \vec{F} на перемещении $d\vec{r}$:

$$dA = \vec{F} d\vec{r}.$$

Мощность силы \vec{F} :

$$N = \vec{F} \vec{v},$$

где \vec{v} — скорость.

Работа сил поля равна убыли потенциальной энергии частицы в данном поле:

$$A = E_{p1} - E_{p2}.$$

Приращение кинетической энергии частицы:

$$E_{k2} - E_{k1} = A,$$

где A — работа результирующей всех сил, действующих на частицу. Приращение полной механической энергии частицы в потенциальном поле:

$$E_2 - E_1 = A_{\text{стор}},$$

где $A_{\text{стор}}$ — алгебраическая сумма работ всех сторонних сил. Закон изменения импульса системы:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F},$$

где \vec{F} — результирующая всех внешних сил.

В замкнутой системе полный импульс не изменяется (закон сохранения импульса):

$$\vec{p} = \sum \vec{p}_i = \sum m_i \vec{v}_i = \text{const}.$$

Момент силы \vec{M} относительно некоторой точки O :

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}],$$

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный из точки O в точку приложения силы \vec{F} .

Момент импульса частицы \vec{L} относительно некоторой точки O :

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = m [\vec{r}, \vec{v}],$$

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный из точки O в точку, где находится частица, $\vec{p} = m\vec{v}$ — импульс частицы.

Закон изменения момента импульса \vec{L} системы:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M},$$

где \vec{M} — суммарный момент всех внешних сил.

Закон сохранения момента импульса:

$$\vec{L} = \Sigma \vec{L}_i = \text{const},$$

т. е. момент импульса замкнутой системы частиц остается постоянным.

3.1. Найти работу, совершаемую при подъеме груза массой $m = 10$ кг по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 45^\circ$ на расстоянии $s = 2$ м, если время подъема $t = 2,0$ с, а коэффициент трения $\mu = 0,10$.

3.2. Парашютист массой $m = 70$ кг совершает затяжной прыжок и через $t = 14$ с имеет скорость $v = 60$ м/с. Считая движение парашютиста равноускоренным, найти работу по преодолению сопротивления воздуха.

3.3. Какую мощность должен развивать трактор при перемещении прицепа массой $m = 5 \cdot 10^3$ кг вверх по уклону со скоростью $v = 1,0$ м/с, если угол наклона $\alpha = 20^\circ$, а коэффициент трения прицепа $\mu = 0,20$?

3.4. Тело массой $m = 1,0$ кг бросили с поверхности Земли под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту с начальной скоростью $v_0 = 8,0$ м/с. Найти мощность силы тяжести в момент времени $t = 5,0$ с. Чему равна работа этой силы за время $t = 5,0$ с? Сопротивлением воздуха пренебречь.

3.5. Какую работу совершают двигатели электропоезда на пути 100 м при разгоне с ускорением $1,5$ м/с² вверх по уклону с углом наклона 10° , если масса электропоезда $1,2 \cdot 10^5$ кг, а коэффициент трения $0,05$?

3.6. Определить мощность двигателя шахтной клетки, поднимающего из шахты глубиной 200 м груз массой $1,0 \cdot 10^4$ кг за 60 с, если КПД равен 80%.

3.7. Поезд массой $1,0 \cdot 10^6$ кг поднимается вверх по уклону с углом наклона $\alpha = 10^\circ$ со скоростью 15 м/с и проходит путь 2,0 км. Определить работу и среднюю мощность, развиваемую тепловозом при движении поезда. Коэффициент трения $0,05$.

3.8. Найти общую мощность, развиваемую моторами электропоезда, который состоит из $n = 6$ вагонов массой по $m = 4,0 \cdot 10^3$ кг, если он в течение $t = 10$ с от начала движения приобрел скорость $v = 10$ м/с. Коэффициент трения принять равным $0,20$.

3.9. Какую работу необходимо затратить, чтобы перевернуть куб массой 5 кг и ребром 0,1 м с одной грани на другую?

3.10. Какую работу необходимо произвести, чтобы телеграфный столб массой 200 кг, к вершине которого прикреплен

крестовина массой 30,0 кг, перевести из горизонтального положения в вертикальное? Длина столба 10,0 м.

3.11. Один раз камень бросают со скоростью v_1 по горизонтальной поверхности льда, а второй раз со скоростью v_2 в воздух под углом 45° к горизонту. В каком случае камню сообщена большая начальная скорость и во сколько раз, если в обоих случаях перемещение камня одинаково? Коэффициент трения камня о лед принять равным $0,02$. Сопротивление воздуха не учитывать.

3.12. Тело массой 2,0 кг под действием силы 50 Н поднимается по наклонной плоскости с углом наклона 30° на высоту 1,0 м. Коэффициент трения тела о наклонную плоскость $0,20$. Определить значение совершенной работы. На что пойдет эта работа?

3.13. На тонкой нити длиной 0,50 м подвешен пружинный пистолет так, что ствол расположен горизонтально. На какой угол отклонится нить после выстрела, если пуля массой $m = 20$ г при вылете из ствола имеет скорость $v = 10$ м/с? Масса пистолета $M = 200$ г.

3.14. Определить мощность Ниагарского водопада, если его высота $h = 50$ м, а среднегодовой расход воды $Q = 5900$ м³/с.

3.15. Какой кинетической энергией обладало тело массой 2,0 кг, если оно поднялось по наклонной плоскости с углом наклона 30° на высоту 1,0 м? Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью $0,10$.

3.16. Пуля массой m ударяется о баллистический маятник массой M и застревает в нем. Какая доля кинетической энергии пули перейдет в теплоту?

3.17. Два шара массами $m_1 = 0,20$ кг и $m_2 = 0,80$ кг, подвешенные на двух параллельных нитях длиной 2,0 м, касаются друг друга. Меньший шар отводится на 90° от первоначального положения и отпускается. 1) Найти скорости шаров после столкновения, считая удар абсолютно упругим. 2) Какова скорость шаров после столкновения, если удар абсолютно неупругий? Какая часть энергии пойдет на нагревание шаров?

3.18. Какая энергия пошла на деформацию двух столкнувшихся шаров массами $m_1 = m_2 = 4,0$ кг, если они двигались навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 3,0$ м/с и $v_2 = 8,0$ м/с, а удар был прямой неупругий?

3.19. Два шара подвешены на тонких параллельных нитях, касаясь друг друга. Меньший шар отводится на 90° от первоначального положения и отпускается. После удара шары поднимаются на одинаковую высоту. Определить массу меньшего шара, если масса большего 0,6 кг, а удар абсолютно упругий.

3.20. Шарик массой m , движущийся горизонтально, ударяется о поверхность призмы массой M так, что отскакивает вертикально вверх на высоту h . Считая удар абсолютно упругим, определить скорость, полученную призмой в результате удара. Трением призмы пренебречь.

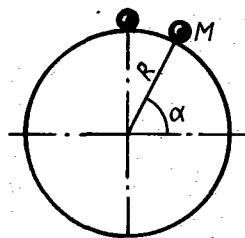


Рис. 3.1

3.21. Молоток массой $0,80$ кг в момент удара о шляпку гвоздя имеет скорость $1,5$ м/с и забивает его в бревно на глубину $5,0$ мм. Какой массы груз необходимо положить на шляпку гвоздя, чтобы он вошел в бревно на такую же глубину?

✓ 3.22. Найти мгновенную мощность, развиваемую силой тяжести, к исходу первой секунды падения тела массой $1,0$ кг. Сопротивление воздуха не учитывать.

3.23. Маленький шарик лежит на поверхности большого шара радиусом $1,0$ м (рис. 3.1).

Какую начальную скорость необходимо сообщить маленькому шарiku, чтобы он оторвался от поверхности большого шара в точке M , расположенной так, что угол $\alpha = 60^\circ$? 1) Трение пренебречь. 2) Считать, что коэффициент трения малого шарика о поверхность большого $\mu = 0,30$.

3.24. Шарик для игры в настольный теннис радиусом $r = 15$ мм и массой $m = 5,0$ г погружен в воду на глубину $h = 30$ см. Когда шарик отпустили, он выпрыгнул из воды на высоту $h_1 = 10$ см. Какое количество теплоты выделилось вследствие трения шарика о воду?

3.25. Груз массой $m = 5,0$ кг поднимается по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ под действием силы $F = 40$ Н, образующей угол $\beta = 30^\circ$ с направлением перемещения. На какое расстояние сместится груз вдоль наклонной плоскости к моменту, когда его скорость $v = 1,0$ м/с, если начальная скорость груза равна нулю и коэффициент трения $\mu = 0,10$?

3.26. Мяч бросили вертикально вверх. Что больше: время подъема или время падения?

3.27. С вышки бросают большой надувной шар так, что один раз ему сообщают начальную скорость, направленную вертикально вверх, а другой раз такую же скорость, но направленную вертикально вниз. В каком случае в момент удара шара о землю его вертикальная скорость будет больше?

✓ 3.28. Груз массой m поднимается на высоту h . Зависит ли при этом работа, совершаемая подъемным механизмом, от скорости подъема? Почему?

3.29. Брусок массой m и длиной l лежит на горизонтальной поверхности стола. Какую работу надо совершить, чтобы повернуть брусок вокруг центра масс в горизонтальной плоскости на малый угол α , если коэффициент трения бруска о стол μ ?

3.30. При взрыве гранаты, летящей со скоростью $8,0$ м/с, образовались два осколка. Осколок, масса которого составляла $0,3$ массы гранаты, продолжал двигаться в прежнем направлении со скоростью 30 м/с. Определить скорость второго осколка.

3.31. Мяч массой 150 г, движущийся со скоростью 6 м/с, ударяется о стенку так, что угол между векторами скорости до удара и после удара равен 60° . Считая удар упругим, опре-

делить его продолжительность, если известно, что средняя сила удара 20 Н.

3.32. Из брандспойта сечением $S = 5,0$ см² горизонтальная струя воды бьет со скоростью $v = 10$ м/с в вертикальную стенку стоящей на рельсах вагонетки и свободно стекает по стенке вниз. С каким ускорением будет двигаться вагонетка, если ее масса $m = 200$ кг, а направление струи воды параллельно рельсам? Сопротивление движению вагонетки принять равным $r = 0,01$ ее силы тяжести.

3.33. Найти начальную скорость скользящей по льду хоккейной шайбы, если она до удара о бортник прошла путь $s = 5,0$ м, а после удара, который можно считать абсолютно упругим, прошла еще некоторый путь и через $t = 2,0$ с остановилась. Коэффициент трения шайбы о лед $0,10$.

3.34. На подножку вагонетки, которая движется прямолинейно со скоростью $2,0$ м/с, прыгает человек массой $m_2 = 60$ кг в направлении, перпендикулярном к ходу вагонетки. Масса вагонетки $m_1 = 240$ кг. Определить скорость вагонетки вместе с человеком.

3.35. Из пушки массой $1,1 \cdot 10^3$ кг произведен выстрел в горизонтальном направлении. Масса снаряда 54 кг. Скорость снаряда относительно Земли $v = 900$ м/с. Определить скорость свободного отката орудия в момент вылета снаряда.

3.36. На платформе установлена безоткатная пушка, из которой производится выстрел вдоль железнодорожного пути под углом 45° к горизонту. Определить начальную скорость снаряда, если известно, что после выстрела платформа откатилась на расстояние $3,0$ м. Масса платформы с пушкой $M = 2,0 \cdot 10^4$ кг, масса снаряда $m = 10$ кг, коэффициент трения качения между колесами платформы и рельсами $\mu = 0,002$.

3.37. Граната брошена под углом 45° к горизонту со скоростью $v_0 = 20$ м/с. Через $2,0$ с после момента бросания граната разбивается на два осколка, массы которых относятся как $1:2$. Меньший осколок в результате взрыва получил дополнительную скорость $v_1 = 50$ м/с, направленную горизонтально вдоль направления бросания гранаты. Определить дальность полета большего осколка, если известно, что меньший осколок упал на расстояние $s_1 = 83$ м. Сопротивление воздуха не учитывать.

3.38. Три лодки каждая массой $M = 250$ кг идут друг за другом со скоростью $v = 5,0$ м/с. Из второй лодки одновременно в первую и третью бросают грузы массой по $m = 20$ кг со скоростью $u = 2,0$ м/с относительно средней лодки. Определить скорости лодок после переброски грузов.

3.39. Две лодки массой $M = 100$ кг каждая идут параллельным курсом навстречу друг другу с одинаковой скоростью $5,0$ м/с. Когда лодки встречаются, из первой во вторую перебрасывают груз массой $m = 25$ кг, а затем из второй лодки в первую перебрасывают такой же груз. В другой раз грузы перебрасы-

вают из лодки в лодку одновременно. Определить скорости лодок в обоих случаях.

3.40. Кувалда массой 20 кг поднята на высоту $h=1,2$ м и свободно падает на наковальню. Какова средняя сила удара кувалды о наковальню, если удар неупругий, а продолжительность удара 0,005 с?

3.41. К материальной точке, положение которой определяется радиус-вектором $\vec{r}=3\vec{i}+2\vec{j}+4\vec{k}$, приложена сила $\vec{F}=5\vec{i}+4\vec{j}+3\vec{k}$. Определить момент силы \vec{M} относительно начала координат, модуль вектора \vec{M} и момент силы M_z относительно оси Z .

3.42. Тело массой $m=100$ г брошено под углом $\alpha=45^\circ$ к горизонту с начальной скоростью $v_0=20$ м/с. Найти модуль момента импульса тела относительно точки бросания в момент нахождения его в наивысшей точке траектории. Сопротивление воздуха не учитывать.

3.43. Доказать, что при движении тела под действием центральной силы момент импульса тела относительно точки, являющейся полюсом поля, есть величина постоянная.

3.44. Показать, что планеты, движущиеся под действием центральных сил, имеют плоскую траекторию. Силой сопротивления движению пренебречь.

3.45. На гладкой горизонтальной плоскости лежит однородный стержень длиной $l=0,50$ м и массой $m=1,0$ кг. По плоскости скользит шарик массой $m_1=0,30$ кг со скоростью $v=10$ м/с, направленной перпендикулярно стержню. Шарик ударяется о стержень и останавливается. Точка удара находится на расстоянии $l_1=20$ см от середины стержня. Диаметр шарика равен диаметру стержня. Определить поступательную скорость стержня после удара и угловую скорость относительно его центра масс.

3.46. Доказать, что человек, стоящий на идеально гладкой горизонтальной плоскости, может повернуться вокруг вертикальной оси, если он начнет вращать руку над головой.

3.47. Показать, что второй закон Кеплера (радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, в равные времена описывает равные площади) есть следствие закона сохранения момента импульса.

3.48. Тело массой m брошено под углом α к горизонту со скоростью v . Найти зависимость от времени модуля момента импульса тела относительно точки бросания. Сопротивлением воздуха пренебречь.

3.49. Из точки с координатами (0, 3, 0) (м) вертикально вверх бросили тело массой $m=0,5$ кг со скоростью $v=5$ м/с. Найти приращение момента импульса тела относительно начала координат за время его полета вверх и обратно в исходную точку. Сопротивлением воздуха пренебречь. Ось направлена вверх.

Уравнение динамики твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси Z :

$$I\epsilon_z = M_z,$$

где M_z — алгебраическая сумма моментов внешних сил относительно оси Z .

Момент инерции некоторых тел:

1) точки массой m на расстоянии R от оси вращения:

$$I = mR^2;$$

2) однородного стержня длиной l относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно стержню:

$$I = \frac{1}{12}ml^2,$$

где m — масса стержня. Если ось вращения перпендикулярна стержню и проходит через его конец, то

$$I = \frac{1}{3}ml^2;$$

3) однородного диска или цилиндра радиусом R и массой m относительно оси, совпадающей с осью диска или цилиндра:

$$I = \frac{1}{2}mR^2;$$

4) тонкостенной трубы или кольца относительно оси, совпадающей с осью трубы или кольца:

$$I = mR^2;$$

5) полого цилиндра массой m относительно оси симметрии:

$$I = \frac{1}{2}m(R_2^2 - R_1^2),$$

где R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы;

6) однородного шара массой m и радиусом R относительно оси, совпадающей с его диаметром:

$$I = \frac{2}{5}mR^2;$$

7) тонкого диска радиусом R и массой m относительно оси, совпадающей с диаметром:

$$I = \frac{1}{4}mR^2.$$

Момент инерции тела I относительно произвольной оси определяется по теореме Штейнера:

$$I = I_0 + ma^2,$$

где I_0 — момент инерции тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс, a — расстояние между осями.

Работа внешних сил при повороте твердого тела вокруг неподвижной оси:

$$A = \int_0^\varphi M_z d\varphi.$$

Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси:

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Кинетическая энергия твердого тела при плоском движении:

$$E_k = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2},$$

где m — масса тела, v_c — скорость центра масс, I — момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс, ω — угловая скорость вращения вокруг той же оси.

Момент импульса твердого тела относительно неподвижной оси Z :

$$L_z = I_z \omega_z,$$

где I_z — момент инерции тела относительно оси Z , ω_z — угловая скорость.

Условия равновесия твердого тела

1. Результирующая всех внешних сил, приложенных к телу, должна быть равной нулю, т. е.

$$\vec{F} = \sum \vec{F}_i = 0.$$

2. Суммарный момент внешних сил относительно любой точки должен быть равен нулю, т. е.

$$\vec{M} = \sum \vec{M}_i = 0.$$

Динамика вращательного движения твердого тела

4.1. Определить момент инерции шара относительно оси, совпадающей с касательной к его поверхности. Радиус шара 0,1 м, его масса 5 кг.

4.2. Чему равен момент инерции тонкого прямого стержня длиной 0,5 м и массой 0,2 кг относительно оси, перпендикулярной к его длине и проходящей через точку стержня, которая удалена на 0,15 м от одного из его концов?

4.3. Определить момент инерции Земли относительно оси вращения, приняв ее за шар радиусом 6,4 Мм и массой $6 \cdot 10^{24}$ кг.

4.4. На барабан радиусом $R=10$ см намотана нить, к концу

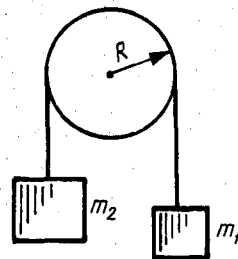


Рис. 4.1

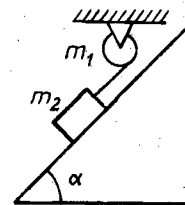


Рис. 4.2

которой привязан груз массой $m=0,50$ кг. Найти момент инерции барабана, если груз опускается с ускорением $a=1,0$ м/с².

4.5. Маховик, представляющий собой диск массой $m=10$ кг и радиусом $R=10$ см, свободно вращается вокруг оси, которая проходит через центр, с круговой частотой 6 с⁻¹. При торможении маховик останавливается через $t=5$ с. Определить тормозящий момент.

4.6. Через блок, масса которого $m=100$ г, перекинута тонкая гибкая нерастяжимая нить, к концам которой подвешены два груза массами $m_1=200$ г и $m_2=300$ г (рис. 4.1). Грузы удерживаются в неподвижном положении. С каким ускорением будут двигаться грузы, если их предоставить самим себе? Чему равно угловое ускорение блока, если его радиус 10 см? Трением пренебречь.

4.7. Из колодца с помощью ворота поднималось ведро с водой массой $m=10$ кг. В момент, когда ведро находилось на высоте $h=5,0$ м от поверхности воды, рукоятка освободилась, и ведро стало двигаться вниз. Определить линейную скорость рукоятки в момент удара ведра о поверхность воды в колодце, если радиус рукоятки $R=30$ см, радиус вала ворота $r=10$ см, его масса $m_1=20$ кг. Трением и массой троса, на котором подвешено ведро, пренебречь.

4.8. Маховик массой $m_1=1,0$ кг укреплен на шкиве радиусом $r=5,0$ см и массой $m_2=200$ г, который приводится во вращение с помощью опускающейся гири массой $m_3=500$ г, привязанной к концу намотанной на шкив веревки. Через какое время скорость маховика достигнет $n=5,0$ об/с? Считать, что вся масса маховика распределена по его ободу на расстоянии $R=40$ см от оси вращения.

4.9. К концу тонкой нерастяжимой нити, намотанной на цилиндрический сплошной неподвижный блок массой $m_1=200$ г, прикреплено тело массой $m_2=500$ г, которое находится на наклонной плоскости с углом наклона $\alpha=45^\circ$ (рис. 4.2). Нить, удерживающая тело, параллельна наклонной плоскости. Какой путь пройдет тело по наклонной плоскости за $t=1,0$ с, если коэффициент трения скольжения по наклонной плоскости $\mu=0,10$? Трением в блоке пренебречь.

4.10. Какой путь пройдет катящийся без скольжения диск, поднимаясь вверх по наклонной плоскости с углом наклона

если ему сообщена начальная скорость $7,0 \text{ м/с}$, параллельно наклонной плоскости?

4.11. Шар скатывается по наклонной плоскости с углом наклона 30° . Какую скорость будет иметь центр шара относительно наклонной плоскости через $1,5 \text{ с}$, если его начальная скорость была равна нулю?

4.12. Какую мощность должен развить мотор, приводящий движение стабилизирующий гироскоп, который имеет форму диска радиусом $R=1,0 \text{ м}$ и массой $m=1000 \text{ кг}$, если в течение $t=1 \text{ мин}$ угловая скорость доводится до $\omega=31 \text{ рад/с}$? Трением и сопротивлением воздуха пренебречь.

4.13. Вычислить кинетическую энергию диска массой 2 кг , катящегося без скольжения по горизонтальной поверхности с относительной скоростью 2 м/с .

4.14. Какую работу нужно совершить, чтобы маховику в виде диска массой 100 кг и радиусом $0,4 \text{ м}$ сообщить частоту вращения $n=10 \text{ об/с}$, если он находился в состоянии покоя?

4.15. Определить тормозящий момент, которым можно остановить за $t=20 \text{ с}$ маховое колесо массой $m=50 \text{ кг}$ и радиусом $R=0,30 \text{ м}$, вращающееся с частотой $n=20 \text{ об/с}$. Массу маховика считать распределенной по ободу. Чему равна работа, совершаемая тормозящим моментом?

4.16. Найти полезную мощность двигателя, приводящего в движение платформу в виде диска массой $m_1=280 \text{ кг}$ и радиусом $R=1,0 \text{ м}$, на краю которой стоит человек массой $m_2=60 \text{ кг}$, если за $t=30 \text{ с}$ платформа приобретает скорость, соответствующую частоте $n=1,2 \text{ об/с}$.

4.17. Диск массой $m_1=5 \text{ кг}$ и радиусом $R=5 \text{ см}$, вращающийся с частотой $n=10 \text{ об/мин}$, приводится в сцепление с неподвижным диском массой $m_2=10 \text{ кг}$ такого же радиуса. Определить энергию, которая пойдет на нагревание дисков, если при их сцеплении скольжение отсутствует.

4.18. При наличии трения обруч скатывается с наклонной плоскости, а при отсутствии — скользит по ней. В каком случае и во сколько раз скорость, которую будет иметь обруч у основания наклонной плоскости, больше?

4.19. Шарик, скатывающийся без скольжения по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha=30^\circ$, ударяется о горизонтальную плоскость и после удара подскакивает на высоту $h=12,5 \text{ см}$ (рис. 4.3). Пренебрегая трением и считая удар абсолютно упругим, определить путь s , пройденный шариком по наклонной плоскости.

4.20. Диск радиусом R раскручивается вокруг вертикальной оси с помощью веревки длиной l , которую тянут с постоянной силой F (рис. 4.4). После этого диск соскакивает с оси и попадает на горизонтальную плоскость. Сколько оборотов сделает диск на плоскости до полной остановки, если его масса M , а коэффициент трения диска о плоскость μ ?

4.21. Два шара одинакового размера, изготовленные из алю-

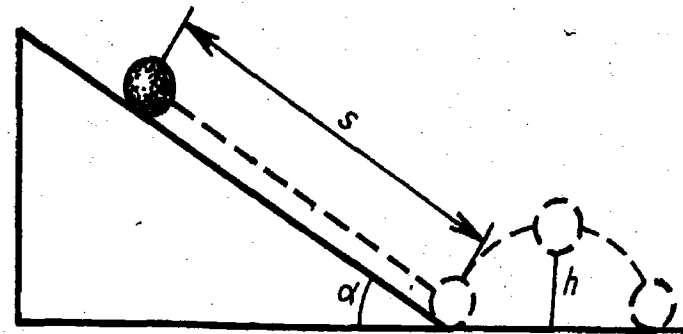


Рис. 4.3

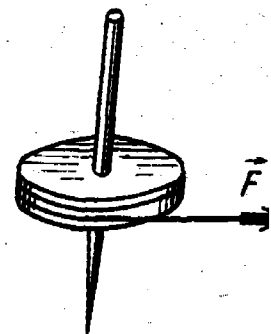


Рис. 4.4

миния и меди, вращаются независимо друг от друга вокруг общей неподвижной оси, проходящей через их центры, с угловыми скоростями $\omega_1=5,0 \text{ рад/с}$ и $\omega_2=10 \text{ рад/с}$. С какой угловой скоростью вращались бы оба шара, если бы их жестко соединили?

Равновесие твердого тела

4.22. Однородный стержень длиной $1,0 \text{ м}$ и массой $5,0 \text{ кг}$ подвешен горизонтально на двух параллельных веревках одинаковой длины. К стержню прикреплен груз массой 10 кг на расстоянии $0,25 \text{ м}$ от одного из его концов. Определить натяжения веревок.

4.23. Через блок, прикрепленный к динамометру, переброшен канатик. Один конец канатика закреплен так, что образует угол $\alpha=60^\circ$ с вертикалью (рис. 4.5). К другому концу подвешен груз массой $m=5,0 \text{ кг}$. Определить показание динамометра.

4.24. На горизонтальной плоскости лежит груз массой $m=10 \text{ кг}$, к которому прикреплены веревки, перекинутые через блоки (рис. 4.6). К концам веревок подвешены грузы m_1 и m_2 . Определить наибольшее значение массы груза m_1 , при котором система будет еще находиться в равновесии, если $m_2=5,0 \text{ кг}$, $\alpha_1=45^\circ$, $\alpha_2=30^\circ$ и коэффициент трения груза о горизонтальную плоскость $\mu=0,50$. Массами блоков и веревок и трением в блоках пренебречь.

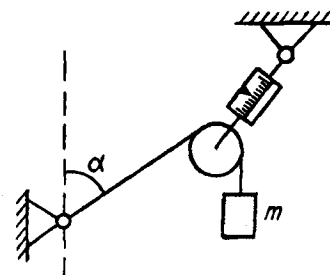


Рис. 4.5

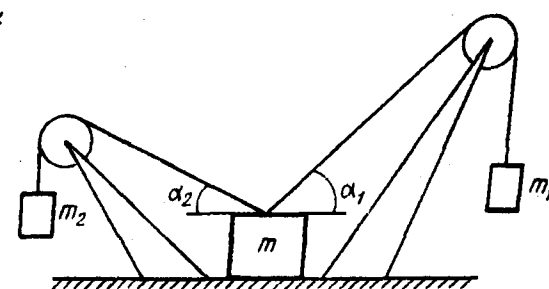


Рис. 4.6

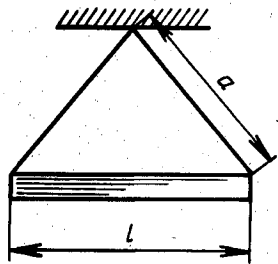


Рис. 4.7

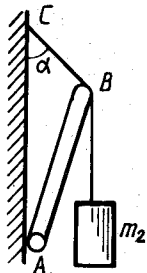


Рис. 4.8

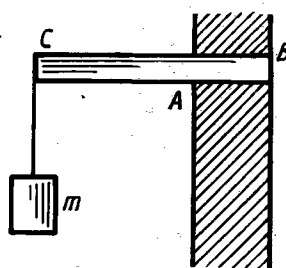


Рис. 4.9

4.25. Однородный стержень массой $m = 2,0$ кг подвешен на двух нитях одинаковой длины, равной $a = 50$ см (рис. 4.7). Определить длину стержня, если натяжение нитей $F = 30$ Н.

4.26. Стержень AB массой $m_1 = 5,0$ кг шарнирно прикреплен нижним концом к вертикальной стенке (рис. 4.8). К верхнему концу стержня, который привязан к стенке веревкой CB , подвешен груз массой $m_2 = 3,0$ кг. Определить натяжение веревки CB , если угол $\alpha = 45^\circ$, а длина веревки CB в 2 раза меньше длины стержня AB .

4.27. На наклонной плоскости с углом наклона 35° стоит однородный прямой цилиндр радиусом 10 см. Чему равна наибольшая высота цилиндра, при которой он еще не опрокинется?

4.28. Однородная горизонтальная балка длиной 1,5 м и массой 50 кг закреплена в стене толщиной 50 см так, что опирается на нее в точках A и B (рис. 4.9). К свободному концу балки подвешен груз массой 100 кг. Определить силы реакции в опорах A и B .

4.29. Однородный шар массой 2 кг прикреплен к вертикальной стене с помощью нити (рис. 4.10). С какой силой шар давит на стену, если нить образует с ней угол $\alpha = 30^\circ$? Трение не учитывать.

4.30. При каком наименьшем значении коэффициента трения между стеной и шаром (см. рис. 4.10) точка A , в которой закреплена нить, и центр шара будут находиться на одной вертикали?

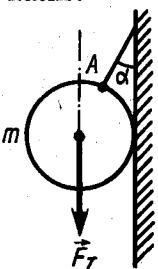


Рис. 4.10

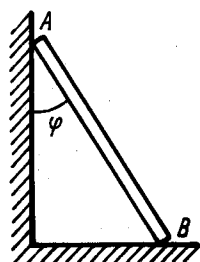


Рис. 4.11

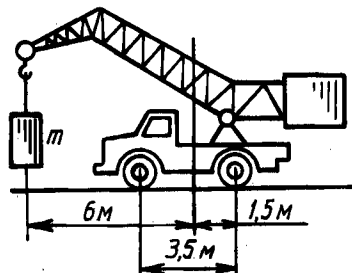


Рис. 4.12

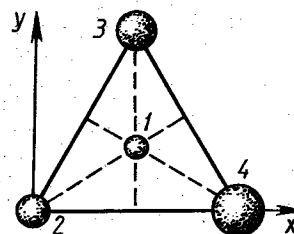


Рис. 4.13

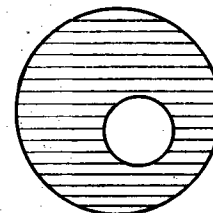


Рис. 4.14

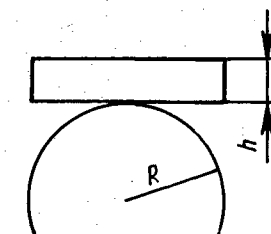


Рис. 4.15

4.31. Лестница AB опирается концом A на вертикальную гладкую стену, а концом B — на пол (рис. 4.11). Коэффициент трения лестницы о пол $\mu = 0,3$. Чему равно наибольшее значение угла φ , образованного лестницей с вертикальной стеной, при котором лестница будет еще находиться в равновесии?

4.32. На грузовом автомобиле установлен подъемный кран (рис. 4.12). Масса автомобиля вместе с краном $3 \cdot 10^3$ кг. Расстояние между осями передних и задних колес 3,5 м. Какой максимальный груз может поднять этот кран, если задняя ось и точка, в которой подвешен груз, находятся на расстояниях 1,5 и 6 м от вертикальной плоскости, проходящей через центр масс автомобиля с краном?

4.33. Найти координаты центра масс системы, состоящей из четырех шариков массами $m_2 = 200$, $m_3 = 300$, $m_4 = 400$ и $m_1 = 100$ г, которые расположены в вершинах и центре равнобедренного треугольника со стороной 20 см. Координатные оси направить так, как указано на рисунке 4.13.

4.34. Определить положение центра масс стержня, состоящего из двух частей одинаковой длины и одинакового поперечного сечения, одна из которых свинцовая, а вторая железная, если его общая длина 0,50 м.

4.35. В однородном диске диаметром 60 см вырезано круглое отверстие диаметром 20 см, центр которого находится на расстоянии 8,0 см от центра диска (рис. 4.14). Определить положение центра масс диска.

4.36. Брусok толщиной h лежит на неподвижном цилиндре, радиус которого R (рис. 4.15). При каком соотношении между h и R брусok будет находиться в положении устойчивого равновесия? Считать, что трение между бруском и цилиндром достаточно велико.

§ 5. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Для стационарного течения несжимаемой жидкости справедливо уравнение неразрывности струи:

$$vS = \text{const},$$

где v — скорость жидкости, S — площадь поперечного сечения трубки тока.

Объем жидкости, протекающей за единицу времени через любое сечение трубки тока (расход):

$$Q = vS.$$

Скорость истечения идеальной жидкости через малое отверстие в широком сосуде:

$$v = \sqrt{2gh},$$

где h — глубина отверстия относительно уровня жидкости в широком сосуде.

Уравнение Бернулли:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости, p — статическое давление жидкости, v — скорость течения жидкости, h — высота сечения трубки тока над некоторым уровнем.

При переходе объема V жидкости из пространства, где давление p_1 , в пространство с давлением p_2 , внешним давлением совершается работа

$$A = (p_2 - p_1)V.$$

При ламинарном течении жидкости помещенное в поток тело испытывает лобовое сопротивление

$$F = r\eta v,$$

где r — коэффициент, зависящий от формы и размера тела, η — вязкость, v — скорость потока.

При движении шара в вязкой среде сила сопротивления (формула Стокса)

$$F = 6\pi R\eta v,$$

где R — радиус шара.

Объем V жидкости, протекающей через трубу длиной l и радиусом R при ламинарном движении за время t , определяется по формуле Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} \Delta p t,$$

где Δp — разность давлений на концах трубки.

В случае турбулентного потока при не очень больших скоростях лобовое сопротивление

$$F = C_x S \rho v^2,$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы тела и числа Рейнольдса, S — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к скорости потока, ρ — плотность среды.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{l\rho v}{\eta},$$

где l — величина, характеризующая линейные размеры обтекаемого тела.

Гидро- и аэростатика

5.1. Определить глубину, на которую необходимо погрузить в воду воздушный пистолет калибра $d = 7,0$ мм, чтобы при нажатии на спусковой крючок выстрел не произошел. Длина ствола пистолета $l = 22$ см. Масса пули $m = 7,0$ г, а ее скорость в момент вылета из ствола при выстреле в воздухе $v = 27$ м/с.

5.2. Определить натяжение троса при поднятии из воды железобетонной плиты объемом $2,4$ м³ с ускорением $0,50$ м/с². Лобовое сопротивление не учитывать. Считать плотность железобетона $\rho_T = 2,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

5.3. Чему равен КПД двигателя, приводящего в действие гидравлический пресс, площади поршней которого относятся как $1:100$, если при подъеме груза массой $m = 5 \cdot 10^4$ кг малый поршень за $t = 1,5$ мин сделал $n = 100$ ходов? Ход малого поршня $h = 20$ см. Мощность двигателя $N = 2,0$ кВт.

5.4. Два шара — алюминиевый и медный, один из которых сплошной, а другой полый, подвешены к концам неравноплечего рычага и уравновешены в воздухе. Установить, какой из шаров является полым, если при погружении их в сосуд с водой равновесие не нарушается. Чему равен объем полости, если масса медного шара $0,4$ кг?

5.5. В сосуд с ртутью и водой брошен стальной шарик. Какая часть объема шарика будет находиться в воде?

5.6. Определить массу пробкового пояса, способного удержать человека массой $m_1 = 60$ кг в воде так, чтобы голова и плечи ($n = 1/8$ объема) не были погружены в воду. Плотность тела человека принять равной $\rho_1 = 1007$ кг/м³.

5.7. Сосуд с водой движется вертикально с ускорением $a = 1,2$ м/с², направленным вверх. Определить давление на глубине $h = 0,20$ м.

5.8. К плавающему в воде пробковому поясу объемом $V = 50$ дм³ подвешена на нити железная гири. Определить массу гири и натяжение нити, если в воду погружена $1/2$ объема пояса.

5.9. Две вертикально расположенные трубы, сечения которых S_1 и S_2 , соединены друг с другом и закрыты невесомыми поршнями, соединенными тонкой невесомой нитью длиной l (рис. 5.1). Пространство между поршнями заполнено водой плотностью ρ . Найти натяжение нити, если концы сосудов открыты в атмосферу.

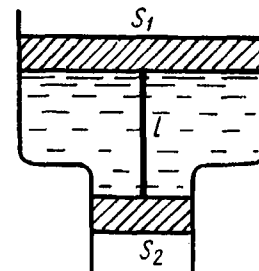


Рис. 5.1

5.10. Бензовоз, цистерна которого заполнена бензином, двигался со скоростью $v = 36$ км/ч и вследствие торможения остановился за $t = 10$ с. Определить, во сколько раз сила давления на переднюю стенку цистерны во время торможения больше, чем на заднюю, если цистерну можно считать прямоугольным параллелепипедом длиной $l = 3,0$ м. Высота заполнения цистерны бензином $h = 0,50$ м.

Гидро- и аэродинамика

5.11. В широком цилиндрическом сосуде, наполненном водой до уровня 75 см, имеются два отверстия, через которые бьют струи воды. Нижнее отверстие находится на высоте 25 см. На какой высоте находится верхнее отверстие, если обе струи пересекают горизонтальную плоскость, расположенную на уровне дна сосуда, в одной точке?

5.12. Бак в тендере паровоза, имеющий длину $l = 4,0$ м, наполнен водой. В задней стенке бака на высоте $h = 1,0$ м от верхнего уровня воды образовалось отверстие, через которое вытекает струя воды. Определить скорость струи, если паровоз движется с ускорением $a = 0,50$ м/с². Чему равна скорость струи при торможении с таким же ускорением?

5.13. В широком сосуде, заполненном водой, на высоте $h = 0,1$ м имеется отверстие сечением $S = 2$ см², через которое вытекает струя воды. К сосуду сверху подведена труба, через которую поступает вода так, что ее уровень в сосуде остается неизменным. Сколько воды должно каждую секунду вливаться в сосуд, чтобы вытекающая через отверстие струя достигла уровня дна в сосуде в точке, находящейся на расстоянии $l = 0,5$ м от края сосуда?

5.14. Ведерко с водой подвешено к пружине и совершает вертикальные гармонические колебания с периодом 2,0 с и амплитудой 10 см. Через малое отверстие в середине дна ведерка вытекает струя воды. Определить наибольшее и наименьшее значения скоростей вытекания воды сквозь отверстие, если уровень воды в ведерке 10 см.

5.15. По трубе сечением $S = 4,0$ см², изогнутой под прямым углом, течет вода. С какой силой вода действует на трубу, если каждую секунду расход воды $Q = 2,0$ кг/с?

5.16. Какую силу необходимо приложить к поршню горизонтально расположенной спринцовки, чтобы вытекающая из нее струя воды имела скорость $v = 10$ м/с? Радиус поршня $R = 2,0$ см. Трением пренебречь.

5.17. Какое сопротивление оказывает воздушный поток, набегающий на автомобиль при скорости движения 144 км/ч, если площадь лобовой поверхности 3,0 м²? Коэффициент лобового сопротивления принять равным $C_x = 0,6$.

5.18. Какую мощность развивает двигатель мотоцикла, если при встречном ветре $v_1 = 10$ м/с мотоциклист едет со скоростью

$v_2 = 20$ м/с? Масса мотоциклиста вместе с мотоциклом $m = 200$ кг, коэффициент трения $\mu = 0,20$, общая площадь лобовой поверхности $S = 1,2$ м².

5.19. Определить мощность воздушного потока, набегающего на электропоезд, который движется со скоростью 100 км/ч, если площадь лобовой поверхности 10 м².

5.20. Через горизонтально расположенную трубу переменного сечения ежеминутно проходит вода объемом 2 м³. Определить разность уровней воды в манометрических трубах в местах сечений диаметрами 0,3 и 0,1 м.

5.21. Определить скорость течения воды в широкой части горизонтально расположенной трубы переменного сечения, если радиус узкой части в 3 раза меньше радиуса широкой части, а разность давлений в широкой и узкой частях трубы $\Delta p = 10$ кПа.

5.22. Какую мощность развивает сердце человека, если при каждом биении левый желудочек, сокращаясь, выталкивает в аорту кровь массой $m = 70$ г под давлением $p = 26$ кПа, а за $t = 1$ мин происходит приблизительно $n = 75$ сокращений желудочка?

5.23. Определить работу, совершаемую при перемещении воды объемом 2 м³ в горизонтальной трубе переменного сечения с давлением от 50 до 20 кПа.

5.24. Стекланный шарик радиусом 0,50 мм падает в большом сосуде с глицерином с установившейся скоростью 5,0 см/с. Найти вязкость глицерина, если плотность стекла $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность глицерина $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

5.25. Чан вместимостью $V = 2,0$ м³ должен быть наполнен водой за $t = 5,0$ мин. Определить наименьший радиус трубы, которая может быть использована для соединения чана с водонапорной башней, находящейся на расстоянии $l = 500$ м, если уровень воды в башне на $h = 20$ м выше уровня отверстия в чане.

5.26. Какое сопротивление испытывает шар диаметром 0,50 м, движущийся в воздухе со скоростью 10 м/с? Считать коэффициент лобового сопротивления для шара $C_x = 0,25$.

5.27. Вычислить максимальное значение скорости потока воды в трубе диаметром 2,0 см, при котором течение будет оставаться ламинарным. Критическое значение числа Рейнольдса для трубы приблизительно равно 3000. Каково соответствующее значение скорости для трубки диаметром 0,10 см?

5.28. Один из методов определения вязкости жидкостей заключается в измерении скорости падения шарика в цилиндре, который заполнен исследуемой жидкостью, и вычислении η по формуле Стокса. Принимая для шара критическое значение числа Рейнольдса $Re = 0,05$, найти максимальное значение радиуса стального шарика, который может быть использован в опыте при определении вязкости глицерина.

5.29. На высоте $h = 200$ км плотность атмосферы равна $\rho = 1,6 \cdot 10^{-10}$ кг/м³. Оценить силу сопротивления, испытываемую

спутником с поперечным сечением $S = 0,50 \text{ м}^2$ и массой $m = 10 \text{ кг}$, летящим на этой высоте.

5.30. В сосуде находятся две несмешивающиеся идеальные жидкости плотностями ρ_1 и ρ_2 . Толщина слоев соответственно h_1 и h_2 . С поверхности жидкости в сосуд опускают шарик. Определить плотность материала шарика, если известно, что он достигает дна сосуда в тот момент, когда скорость становится равной нулю.

§ 6. НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА. СИЛЫ ИНЕРЦИИ

В системе отсчета, движущейся относительно какой-либо инерциальной системы поступательно и прямолинейно с ускорением \vec{a} , на тело действует сила инерции

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}.$$

В системе отсчета, вращающейся с постоянной угловой скоростью ω относительно какой-либо инерциальной системы, действует центробежная сила инерции

$$\vec{F}_{\text{цб}} = m\omega^2 \vec{R}$$

и сила Кориолиса

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}],$$

где \vec{R} — радиус-вектор, проведенный от оси вращения к центру масс тела, \vec{v}' — скорость тела относительно вращающейся неинерциальной системы.

6.1. Определить скорость электропоезда в момент начала торможения, считая его движение равнозамедленным, если он остановился, пройдя путь $s = 200 \text{ м}$, а подвешенный в вагоне отвес при торможении отклонился на угол $\alpha = 5^\circ$ от вертикального направления.

6.2. С каким ускорением должна двигаться в горизонтальном направлении наклонная плоскость с углом наклона $\alpha = 30^\circ$, чтобы при отсутствии трения находящееся на ней тело не перемещалось относительно наклонной плоскости?

6.3. С каким наименьшим горизонтально направленным ускорением должна двигаться наклонная плоскость с углом наклона α , чтобы лежащее на ней тело поднималось по наклонной плоскости? Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью μ .

6.4. На наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 10^\circ$ лежит тело. Наклонная плоскость движется с ускорением $a = 1 \text{ м/с}^2$, направленным горизонтально, как указано на рисунке 6.1. Чему должно быть равно наименьшее значение коэффициента трения μ между телом и наклонной плоскостью, чтобы тело не скользило по ней? Чему должно быть равно соответствующее зна-

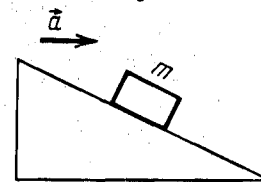


Рис. 6.1

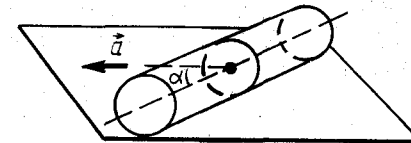


Рис. 6.2

чение коэффициента трения, если ускорение наклонной плоскости будет направлено в противоположную сторону?

6.5. В горизонтально расположенной трубке находится шарик (рис. 6.2). Какой путь пройдет этот шарик за время $t = 1,0 \text{ с}$, если трубка будет двигаться в горизонтальном направлении с ускорением $a = 2,0 \text{ м/с}^2$, направленным под углом $\alpha = 45^\circ$ к трубке? Коэффициент трения скольжения между шариком и трубкой $\mu = 0,20$.

6.6. На горизонтально расположенном диске, вращающемся вокруг вертикальной оси, на расстоянии $R = 8 \text{ см}$ от оси вращения лежит тело. Определить коэффициент трения между диском и телом, если при угловой скорости $\omega = 5 \text{ рад/с}$ тело начинает скользить по поверхности диска.

6.7. По горизонтальному участку дороги едет велосипедист, описывая дугу радиусом 10 м . Под каким углом к горизонту наклонен велосипедист, если его скорость $6,0 \text{ м/с}$?

6.8. С какой наименьшей скоростью может ехать мотоциклист по внутренней вертикальной стене цилиндрического строения радиусом $R = 12 \text{ м}$, описывая горизонтальную окружность, если коэффициент трения покрышек о стену $\mu = 0,50$, а центр масс мотоциклиста и мотоцикла находится на расстоянии $l = 1,0 \text{ м}$ от стены?

6.9. Горизонтально расположенный стержень длиной $l_1 = 0,50 \text{ м}$ вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 2,0 \text{ рад/с}$ относительно вертикальной оси, проходящей через его середину. На стержень надеты две небольшие муфты, которые связаны нитью длиной $l_2 = 10 \text{ см}$ и расположены симметрично относительно оси вращения. С какой скоростью относительно стержня муфты подойдут к его концам, если нить пережечь? Трение не учитывать.

6.10. Доказать, что во вращающемся вокруг вертикальной оси сосуде поверхность жидкости имеет форму параболоида вращения.

6.11. В центре горизонтально расположенного диска радиусом $R = 2 \text{ м}$ установлена мишень, а на его краю — воздушный пистолет. При неподвижном диске шарик попадает в центр мишени. Если диск вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр, с постоянной угловой скоростью $\omega = 0,5 \text{ рад/с}$, то шарик попадает в точку мишени, смещенную от ее центра на $s = 10 \text{ см}$. Определить скорость шарика.

6.12. Электровоз массой $1 \cdot 10^5$ кг движется с севера на юг в северном полушарии по горизонтальному прямолинейному пути со скоростью 30 м/с на широте 60° . Определить горизонтальную составляющую силы, с которой электровоз давит на рельсы.

6.13. Определить, на сколько изменится сила, действующая на поверхность Земли, если тело массой m , движущееся вдоль экватора с востока на запад со скоростью v , изменит направление движения на противоположное.

6.14. На географической широте $\varphi = 60^\circ$ тело свободно падает на Землю с высоты $h = 200$ м. Определить отклонение тела под влиянием кориолисовой силы инерции, вызванной вращением Земли.

6.15. В точке, расположенной на широте $\varphi = 60^\circ$, из ружья произведен выстрел строго вертикально вверх. Через некоторое время пуля упала на Землю. Определить, на сколько сместилась упавшая пуля от точки выстрела, если ее начальная скорость $v_0 = 200$ м/с. Сопротивление воздуха не учитывать.

6.16. В Ленинграде в Исаакиевском соборе установлен маятник Фуко, длина которого 98 м. На какой угол повернется плоскость качаний маятника за время 10 мин? Географическая широта Ленинграда 60° . Решить задачу в двух системах отсчета: неинерциальной и гелиоцентрической.

§ 7. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Преобразования Лоренца¹:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где c — скорость света в вакууме.

Сокращение длины движущегося тела:

$$l' = l \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где l' — длина движущегося тела, l — собственная длина.

Замедление хода движущихся часов:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где t' — интервал времени между событиями в движущейся системе отсчета, Δt — интервал времени между теми же событиями в неподвижной системе.

Релятивистский закон сложения скоростей:

¹ Штрихи относятся к пространственно-временным координатам системы отсчета, движущейся относительно неподвижной системы координат со скоростью v в положительном направлении оси X , причем оси X' и X совпадают, а оси Y' и Y , Z' и Z параллельны.

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2}, \quad u_y = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2} u'_y}{1 + vu'_x/c^2}, \quad u_z = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2} u'_z}{1 + vu'_x/c^2},$$

где u_x, u_y, u_z — проекции скорости в неподвижной системе координат, u'_x, u'_y, u'_z — проекции скорости в движущейся системе.

Квадрат интервала s_{12} между событиями 1 и 2 — инвариантная величина:

$$s_{12}^2 = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2,$$

где t_{12} — интервал времени между событиями 1 и 2, l_{12} — расстояние между точками 1 и 2, в которых произошли данные события.

Релятивистские масса и импульс:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m_0 — масса покоя.

Полная энергия тела:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где $E_0 = m_0 c^2$ — энергия покоя.

Кинетическая энергия движущегося тела:

$$E_k = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

7.1. Получить обратные преобразования Лоренца:

$$x = \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

7.2. Стержень движется с некоторой постоянной скоростью v . Его длина в неподвижной системе $l_1 = 3,0$ м, а в системе отсчета, связанной со стержнем, $l_2 = 6,0$ м. Определить собственную длину стержня и его скорость относительно неподвижной системы отсчета.

7.3. Скорость движения Земли вокруг Солнца $v = 30$ км/с. Найти сокращение диаметра Земли в системе координат, связанной с Солнцем.

7.4. Реактивный самолет летит со скоростью 1000 м/с. На сколько часы, находящиеся в самолете, будут отставать от часов на Земле?

7.5. Один из близнецов в возрасте 20 лет отправляется в далекое космическое путешествие к звезде Арктур на корабле со скоростью $v = 0,99 c$. Для жителей Земли расстояние до звезды Арктур составляет 40 св. лет (т. е. расстояние таково, что свет от звезды доходит до Земли за 40 лет). На сколько лет космический путешественник окажется моложе своего брата, оставшегося на Земле?

7.6. Пользуясь преобразованиями Лоренца, вывести релятивистский закон сложения скоростей.

7.7. Пользуясь формулами сложения скоростей теории относительности, доказать, что сложение скоростей никогда не приводит к скоростям, большим скорости света.

7.8. Показать, что фотон, излучаемый в направлении Земли со скоростью c звездой, которая движется к Земле со скоростью v , приближается к ней не со скоростью $c+v$, а со скоростью c .

7.9. Две ракеты удаляются от Земли в прямо противоположные стороны со скоростью $0,8 c$ относительно Земли. Найти, с какой скоростью движется одна ракета в системе отсчета, связанной с другой ракетой.

7.10. Ускоритель сообщил радиоактивному ядру скорость $v=0,4 c$. В момент вылета из ускорителя ядро выбросило в направлении своего движения β -частицу со скоростью $0,75 c$ относительно ускорителя. Найти скорость частицы относительно ядра.

7.11. Каков возраст космонавта по часам Земли, если он в 30-летнем возрасте улетел на расстояние до 20 св. лет? Считать его возраст по часам космонавта 35 лет.

7.12. Во сколько раз релятивистская масса электрона, движущегося со скоростью $v=0,999 c$, больше его массы покоя?

7.13. Релятивистская масса тела, движущегося с определенной скоростью, возросла по сравнению с его массой покоя на 20%. Во сколько раз при этом уменьшилась его длина?

7.14. Релятивистская масса движущегося протона в 10^2 раз больше его массы покоя. Найти скорость движущегося протона.

7.15. Тело движется со скоростью $200,0$ Мм/с. Во сколько раз увеличилась плотность движущегося тела по сравнению с плотностью того же тела, находящегося в покое? (Размеры тела, перпендикулярные к направлению движения, не сокращаются.) При решении задачи использовать определение плотности как отношение массы покоя тела к его объему.

7.16. Электрон движется со скоростью $200,0$ Мм/с. Определить кинетическую энергию по классической и релятивистской формулам. Сравнить результаты.

7.17. Найти отношение кинетической энергии электрона к его энергии покоя, если скорость электрона $150,0$ Мм/с. Каков релятивистский импульс электрона?

7.18. Полная энергия мезона в 8 раз больше его энергии покоя. Какова скорость мезона?

7.19. Какому изменению массы соответствует изменение энергии на $1,0$ Дж?

7.20. Показать, что кинетическая энергия в релятивистском случае $E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right)$ при малых скоростях движения

переходит в классическое выражение для кинетической энергии: $m_0 v^2 / 2$.

§ 8. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

Относительная продольная деформация:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где Δl — приращение длины при растяжении или сжатии, l_0 — длина тела до деформации.

Относительной деформацией кручения называется отношение угла закручивания к длине стержня:

$$\epsilon_\varphi = \varphi / l.$$

Относительное изменение объема при продольной деформации:

$$\frac{\Delta V}{V} = \epsilon_l (1 - 2\mu),$$

где μ — коэффициент Пуассона, равный отношению относительной поперечной деформации к продольной:

$$\mu = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_l}.$$

Напряжение при упругой деформации:

$$\sigma = \frac{dF}{dS},$$

где dF — сила, действующая на элементарно малый участок данного сечения.

Зависимость между относительной продольной деформацией и деформирующей силой (закон Гука):

$$\epsilon_l = \alpha \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \frac{F}{S},$$

где α — коэффициент упругости, E — модуль Юнга.

Разрушающая сила:

$$F_m = \sigma_m S,$$

где σ_m — разрушающее напряжение.

Относительное изменение толщины:

$$\epsilon_d = \frac{\Delta d}{d} = \beta \sigma,$$

где β — коэффициент поперечного сжатия при продольном растяжении.

Деформация сдвига характеризуется углом сдвига, определяемым по формуле:

$$\psi = n \frac{F_\tau}{S} = n p_\tau = \frac{\sigma_\tau}{G},$$

где n — коэффициент сдвига, F_τ — сила, вызывающая сдвиг, σ_τ — касательное напряжение, G — модуль сдвига.

Модуль Юнга E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона μ связаны соотношением

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

Угол закручивания стержня:

$$\varphi = \frac{2Ml}{\pi GR^4}$$

где M — вращающий момент, l — длина стержня, R — радиус стержня.

Потенциальная энергия упруго деформированного стержня:

$$E_p = \frac{E\epsilon_l^2}{2}V,$$

где V — объем стержня.

Плотность энергии упруго деформированного стержня:

$$w = \frac{1}{2}E\epsilon_l^2$$

8.1. Груз, подвешенный на резиновом шнуре длиной 50 см, вращают в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью так, что шнур описывает коническую поверхность с углом при вершине 120° . Определить относительное удлинение шнура при вращении, если при неподвижном грузе растяжение шнура 1 см. Растяжение считать пропорциональным приложенной силе.

8.2. Какую нагрузку необходимо приложить к алюминиевому стержню, чтобы он при температуре 10°C имел ту же длину, что и при 0°C ? Площадь поперечного сечения стержня $S = 1,5 \text{ см}^2$. Модуль Юнга $E = 70 \text{ ГПа}$.

8.3. Резиновый шнур растянут так, что его длина увеличилась в 2 раза. Каков диаметр растянутого шнура, если до растяжения он был 1 см, а коэффициент Пуассона для резины 0,5?

8.4. Определить относительное изменение объема стальной проволоки диаметром 2 мм при растяжении ее силой 1 кН. Коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

8.5. При какой длине подвешенная вертикально стальная проволока начинает рваться под действием собственного веса? Предел прочности стали $R_m = 0,69 \text{ ГПа}$.

8.6. Относительное изменение объема при продольной деформации стержня равно нулю. Определить коэффициент Пуассона материала стержня.

8.7. Прямая проволока длиной l поднимается вертикально вверх под действием силы, приложенной к ее верхнему концу. При каком ускорении наступит разрыв проволоки?

8.8. Найти относительное удлинение проволоки длиной l , поднимавшейся вертикально вверх с ускорением a , под действием постоянной силы, которая приложена к ее верхнему концу.

8.9. Определить коэффициент Пуассона алюминиевого стержня, если известно, что под действием некоторой силы, перпен-

дикулярной сечению стержня, относительная продольная деформация равна $\epsilon_l = 0,001$, а при касательном направлении такой же силы относительный сдвиг равен $\psi = 0,0027$.

8.10. Определить толщину нити, на которой подвешена рамка зеркального гальванометра, если под действием вращающего момента $M = 0,3 \text{ пН} \cdot \text{м}$ она поворачивается на угол $\varphi = 2^\circ$. Длина нити $l = 10 \text{ см}$. Модуль сдвига материала нити $G = 6,5 \text{ ГПа}$.

8.11. Определить относительное удлинение медного стержня, если при его растяжении совершается работа $0,12 \text{ Дж}$. Длина стержня 2 м, площадь его поперечного сечения 1 мм^2 .

8.12. Чему равна плотность упругой энергии растянутого стального стержня, если относительное удлинение $0,001$?

8.13. Два вагона массами $m = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг}$,двигающиеся навстречу друг другу со скоростями $v = 2 \text{ м/с}$,сталкиваются. Определить сжатие пружины буферов вагонов, если под действием силы $F = 40 \text{ кН}$ пружина сжимается на $x_0 = 1 \text{ см}$. Считать, что сжатие пружины пропорционально силе.

8.14. Определить силу, с которой гимнаст массой $m = 60 \text{ кг}$ действует на упругую сетку при прыжке с высоты $h = 8,0 \text{ м}$, если под действием силы тяжести гимнаста сетка прогибается на $x_0 = 16 \text{ см}$.

8.15. Какую силу необходимо развить при натяжении лука на $x = 0,20 \text{ м}$, если вся совершаемая работа идет на сообщение стреле кинетической энергии, а наибольшая дальность полета стрелы $s = 36 \text{ м}$? Масса стрелы $m = 50 \text{ г}$.

8.16. На какую высоту поднимается камень массой $m = 30 \text{ г}$, выпущенный вертикально вверх из рогатки, резиновый жгут которой сечением $S = 0,20 \text{ см}^2$ и длиной $l = 30 \text{ см}$ был растянут на $\Delta l = 20 \text{ см}$? Сопротивление воздуха не учитывать. Модуль Юнга для резины $E = 7,8 \text{ МПа}$.

8.17. Самолет садится на палубу авианосца, имея скорость 100 км/ч . Зацепившись за канат торможения, самолет пробегает до полной остановки 50 м. Определить перегрузки, если жесткость каната не меняется по мере его растяжения.

8.18. Подставку, на которой лежит тело, подвешенное на пружине, опускают с ускорением $a < g$. До какой максимальной длины растянется пружина, если в начальный момент она была не растянута? Масса тела m , жесткость пружины k .

§ 9. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Уравнение затухающих колебаний и его решение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

где β — коэффициент затухания, ω — частота затухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

Логарифмический декремент затухания:

$$\Theta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \beta T.$$

Период малых колебаний математического маятника:

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

где l — длина маятника, g — ускорение силы тяжести.

Период колебаний тела, подвешенного на пружине:

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

где m — масса тела, k — жесткость пружины.

Период малых колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{L/g},$$

где $L = \frac{I}{md}$ — приведенная длина физического маятника, I — момент инерции маятника относительно оси качаний, m — масса маятника, d — кратчайшее расстояние от центра масс до оси качаний.

Период крутильных колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{I/k},$$

где I — момент инерции, $k = \frac{M}{\varphi}$ (M — момент силы, φ — угол закручивания).

Период затухающих колебаний:

$$T = 2\pi / \sqrt{k/m - \beta^2},$$

где $\beta = \frac{r}{2m}$ — коэффициент затухания.

Амплитуда вынужденных колебаний при действии вынуждающей силы $F = F_0 \cos \omega t$:

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

где $f_0 = \frac{F_0}{m}$, $\omega_0 = 2\pi \nu_0 = \sqrt{k/m}$, $\omega = 2\pi \nu$, ν и ν_0 — частоты собственных колебаний при отсутствии затухания и вынуждающей силы.

Период колебаний однородной струны:

$$T = 2l \sqrt{m/F},$$

где l — длина струны, m — масса единицы длины струны, F — сила натяжения струны.

Полная энергия материальной точки массой m , которая совершает гармонические колебания:

$$E = E_k + E_p = \frac{m\omega^2 A^2}{2}.$$

Скорость распространения волны:

$$v = \lambda \nu,$$

где λ — длина волны.

Скорость распространения продольных волн в тонких стержнях:

$$v = \sqrt{E/\rho},$$

где E — модуль Юнга среды, ρ — ее плотность.

Скорость распространения поперечных волн:

$$v = \sqrt{G/\rho},$$

где G — модуль сдвига.

Скорость продольных волн в неограниченной упругой среде:

$$v = \sqrt{k/\rho},$$

где k — модуль всестороннего сжатия.

Уровень громкости звука, дБ:

$$L_N = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где I — интенсивность звука, I_0 — интенсивность на пороге слышимости.

Частота звука, воспринимаемая наблюдателем, согласно принципу Доплера, определяется по формуле:

$$\nu' = \frac{c \pm v}{c \mp u} \nu,$$

где c — скорость распространения звука, v — скорость движения наблюдателя, u — скорость источника звука, ν — частота звука, посылаемого источником. Верхние знаки берутся при сближении источника и наблюдателя, нижние — при их удалении.

Колебания

9.1. Тело массой 5 г совершает колебание, которое описывается уравнением:

$$x = 0,1 \sin \frac{\pi}{2} \left(t + \frac{1}{3} \right).$$

Найти значения кинетической и потенциальной энергий тела через 20 с от момента времени $t = 0$. Чему равна полная энергия тела?

9.2. Определить массу тела, совершающего гармонические колебания с амплитудой 0,10 м, частотой 2,0 Гц и начальной фазой 30° , если полная энергия колебаний 7,7 мДж. Через сколько секунд от начала отсчета времени кинетическая энергия будет равна потенциальной?

9.3. Определить амплитуду гармонических колебаний материальной точки, если ее полная колебательная энергия 40 мДж, а действующая на нее сила при смещении, равно половине амплитуды, 2,0 Н.

9.4. Во сколько раз уменьшится полная энергия колебаний секундного маятника за 5 мин, если логарифмический декремент затухания 0,031?

9.5. Амплитуда колебаний камертона за 15 с уменьшилась в 100 раз. Найти коэффициент затухания колебаний.

9.6. Построить график затухающего гармонического колебания, частота которого 10 Гц, начальная амплитуда 6 см и логарифмический декремент затухания 0,01.

9.7. Как изменится ход маятниковых часов при поднятии их на высоту 20 км над поверхностью Земли?

9.8. Математический маятник подвешен к потолку вагона электропоезда. Во сколько раз изменится его период колебаний, если вагону сообщить горизонтальное ускорение a ?

9.9. Шарик массой $m=200$ г, подвешенный на пружине, колеблется с частотой $\nu=5,0$ Гц. Определить коэффициент упругости пружины.

9.10. Определить период колебаний груза на пружинных весах, если в состоянии равновесия он смещает стрелку весов на $\Delta x=2,0$ см от нулевого деления, соответствующего ненагруженной пружине.

9.11. Определить минимальную частоту колебаний наклонной плоскости (в продольном направлении), при которой находящееся на ней тело начнет скользить. Угол наклона плоскости $\alpha=10^\circ$, амплитуда колебаний $A=10$ см, коэффициент трения тела о наклонную плоскость $\mu=0,4$.

9.12. С какой частотой будет совершать колебания маленький тяжелый шарик, помещенный между двумя пересекающимися плоскостями, которые образуют угол $\alpha=170^\circ$, если одна из плоскостей образует угол $\beta=5^\circ$ с горизонтом, а шарик первоначально был поднят на высоту $h=10$ см (рис. 9.1)? Трение и удар шарика о плоскость отсутствуют.

9.13. стакан массой $m_1=20$ г и площадью поперечного сечения $S=5$ см² содержит ртуть массой $m_2=80$ г и плавает на поверхности воды. Под действием вертикальной силы стакан выводится из положения равновесия и отпускается. Определить период колебаний системы.

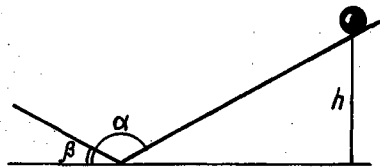


Рис. 9.1

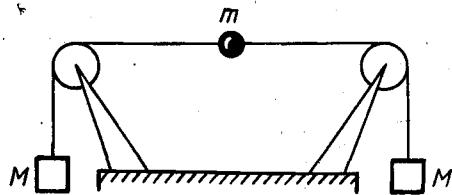


Рис. 9.2

9.14. Найти частоту колебаний груза массой $m=0,20$ кг, подвешенного на пружине и помещенного в масло, если коэффициент трения в масле $r=0,50$ кг/с, а жесткость пружины $k=50$ Н/м.

9.15. Стержень длиной $l=50$ см совершает колебания около горизонтальной оси, проходящей через точку, которая расположена на расстоянии $d=12,5$ см от конца стержня. Определить частоту колебаний стержня.

9.16. На концах стержня, масса которого $m=60$ г и длина $l=49$ см, укреплены два шарика массами $m_1=70$ г и $m_2=90$ г, а стержень подвешен так, что может совершать колебания около горизонтальной оси, проходящей через его середину. Определить период малых колебаний стержня.

9.17. К потолку лифта подвешен стержень за один конец так, что может совершать колебания. Длина стержня 50 см. Определить период колебаний стержня, если лифт движется с ускорением $1,2$ м/с², направленным вверх.

9.18. Однородный диск радиусом $R=0,10$ м совершает колебания вокруг горизонтальной оси, которая проходит через точку, расположенную на расстоянии $\frac{R}{2}$ от центра диска, и перпен-

дикулярна плоскости диска. Определить частоту колебаний диска.

9.19. Струна, на концах которой закреплены грузы массой $M=0,40$ кг каждый, перекинута через два неподвижных блока, расположенных на расстоянии 1,0 м (рис. 9.2). К середине струны прикреплен точечный грузик массой $m=9,8$ г. Определить период малых поперечных колебаний грузика. Массу струны и ее начальное натяжение, вызванное грузиком m , не учитывать.

9.20. Определить период крутильных колебаний железного шара радиусом $R=0,1$ м, подвешенного на стальной проволоке радиусом $r=1$ мм и длиной $l=1$ м. Модуль сдвига для стали принять равным $G=80$ ГПа.

9.21. Определить амплитуду вынужденных колебаний груза массой 0,2 кг, подвешенного на пружине жесткостью 20 Н/м, если действует вынуждающая сила с амплитудой 2 Н и частотой в 2 раза большей собственной частоты колебаний груза, а коэффициент затухания $0,5$ с⁻¹.

9.22. Шар-зонд, имеющий нерастяжимую оболочку, поднялся на максимальную высоту и совершает малые колебания около равновесного уровня. Найти период этих колебаний, считая, что на такой высоте плотность воздуха убывает с высотой равномерно на $\delta=1,2 \cdot 10^{-2}$ через каждые $h=100$ м. Трением шара о воздух пренебречь.

9.23. Два шарика массами m_1 и m_2 , скрепленные между собой пружиной, жесткость которой k , лежат на горизонтальной плоскости. Пружина растягивается и отпускается. Определить период возникших колебаний шариков. Трение не учитывать.

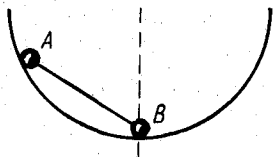


Рис. 9.3

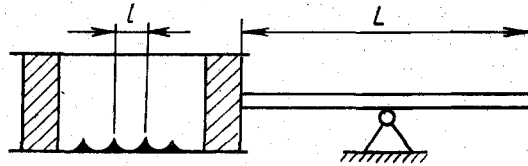


Рис. 9.4

9.24. В каком случае тело, находящееся в точке A (рис. 9.3), достигнет точки B быстрее: если оно будет скользить по поверхности сферы или вдоль прямой AB ? Считать, что расстояние AB гораздо меньше радиуса, а трение в обоих случаях пренебрежимо мало. Начальная скорость тела равна нулю.

9.25. Как определить неизвестную массу тела m_1 , имея секундомер, пружину и другое тело известной массы m_2 ?

Волновое движение. Акустика

9.26. Найти скорость распространения звуковых колебаний в воздухе, длина волны которых 1,0 м, а частота колебаний 340 Гц. Чему равна максимальная скорость смещения частиц воздуха, если амплитуда колебаний 0,2 мм?

9.27. На каком расстоянии от источника колебаний, совершаемых по закону синуса, в момент времени $t = \frac{T}{2}$ смещение точки от положения равновесия равно половине амплитуды? Скорость распространения колебаний 340 м/с. Период колебаний 10^{-3} с.

9.28. Определить скорость распространения волн в озере, если период качания лодки, находящейся на поверхности воды, 4,0 с, а расстояние между ближайшими гребнями волн 6,0 м.

9.29. Во сколько раз изменится длина ультразвуковой волны при переходе волны из стали в медь, если скорости распространения ультразвука в меди и стали соответственно 3600 и 5500 м/с?

9.30. Найти скорость распространения ультразвука в железе, если модуль Юнга для железа 20 ГПа, а плотность 7800 кг/м³.

9.31. Определить скорость распространения поперечных звуковых волн в меди. Модуль сдвига для меди 12,0 ГПа, плотность меди 8900 кг/м³.

9.32. Определить скорость звука в воде, если известно, что модуль всестороннего сжатия воды 1,98 ГПа.

9.33. Чему равен коэффициент всестороннего сжатия воды, если посланный с корабля ультразвуковой сигнал, отразившись на глубине $h = 1,5$ км, вернулся через $t = 2,1$ с?

9.34. Определить натяжение стальной струны длиной 0,50 м и диаметром 0,20 мм, если известно, что она настроена в унисон с камертоном, частота которого 430 Гц.

9.35. Найти скорость распространения поперечных звуковых

волн в стальной струне диаметром 1,0 мм, натянутой с силой 100 Н.

9.36. Чему равна скорость распространения звуковой волны в медной проволоке длиной 10 м, которая натянута силой 200 Н? Масса проволоки 50 г.

9.37. Сколько биений в секунду дает натянутая стальная струна с камертоном, частота колебаний которого 430 Гц, если натяжение струны 100 Н, ее длина 0,5 м, а диаметр 0,3 мм?

9.38. В приборе Кундта при продольном натирании железного стержня длиной $L = 0,50$ м, который закреплен в середине, порошок, насыпанный в стеклянную трубку, образовал слой неодинаковой плотности, причем расстояние между двумя максимумами плотности оказалось равным $l = 3,0$ см (рис. 9.4). Определить скорость звука в железе, если в воздухе она составляет 340 м/с.

9.39. Определить частоту основного тона открытой трубы длиной 1,0 м, которая заполнена воздухом.

9.40. Чему равна частота основного тона закрытой с одного конца трубы длиной 1,5 м, если она заполнена водой? Скорость распространения звука в воде принять равной 1,5 км/с.

9.41. Уровень громкости шума самолета на расстоянии 5 м равен 120 дБ, а тихого разговора на том же расстоянии — 40 дБ. Определить отношение интенсивностей и абсолютные значения интенсивностей этих звуков.

9.42. На сколько децибелов отличаются звуки, соответствующие порогу слышимости ($I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²) и порогу болевых ощущений ($I = 10^2$ Вт/м²)?

9.43. Подводная лодка, движущаяся со скоростью $v = 10$ м/с, посылает ультразвуковой сигнал частотой $\nu = 30$ кГц, который, отразившись от препятствия, возвращается обратно. Определить разницу между частотами посылаемого и принятого сигналов.

9.44. Два катера движутся навстречу друг другу с одинаковой скоростью, равной $v = 10,0$ м/с. С первого катера посылается ультразвуковой сигнал частотой $\nu = 50,0$ кГц, который отражается от второго катера и принимается на первом. Определить частоту принятого сигнала.

9.45. Два электропоезда идут навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 30,0$ м/с и $v_2 = 10,0$ м/с. Первый поезд дает свисток, высота тона которого соответствует частоте $\nu = 500$ Гц. Определить частоту, воспринимаемую пассажиром второго электропоезда перед встречей и после встречи поездов. Чему были бы равны соответствующие частоты, если бы пассажир находился на первом электропоезде, а сигнал давал второй?

9.46. Подводная лодка, погружаясь вертикально, излучает короткие звуковые импульсы сигнала гидролокатора длительностью t_0 в направлении дна. Длительность отраженных сигналов, измеренных гидроакустиком на лодке, равна t . Какова скорость погружения лодки? Скорость звука в воде v , дно горизонтальное.

§ 10. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Две материальные точки массами m_1 и m_2 , расположенные на расстоянии r , взаимодействуют с силой

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где G — гравитационная постоянная.

При движении планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет (в том числе и искусственных) кубы больших полуосей эллипсов пропорциональны квадратам времен обращения планет (третий закон Кеплера):

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}.$$

10.1. Первый искусственный спутник Земли имел период обращения 1 ч 36 мин. Считая орбиту спутника круговой, а движение равномерным, определить высоту полета спутника над поверхностью Земли.

10.2. На какую высоту необходимо запустить искусственный спутник Земли, чтобы с Земли он казался неподвижным, а его орбита была круговой и лежала в плоскости экватора? Радиус Земли $R_3 = 6,37$ Мм, а период суточного вращения $T = 24$ ч.

10.3. Какую скорость необходимо сообщить телу, чтобы оно могло удалиться с поверхности Луны в бесконечность? Масса Луны $M_{\text{л}} = 7,3 \cdot 10^{22}$ кг, радиус Луны $R_{\text{л}} = 1,74$ Мм.

10.4. Определить скорость движения Луны вокруг Земли, считая, что Луна движется по круговой орбите. Принять массу Земли равной $M_1 = 5,96 \cdot 10^{24}$ кг, а расстояние между Луной и Землей $R = 384,4$ Мм.

10.5. На каком расстоянии от центра Земли космическая ракета, движущаяся к Луне, будет притягиваться Землей и Луной с одинаковой силой? Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а расстояние между их центрами в 60 раз больше радиуса Земли.

10.6. С какой скоростью движется вокруг Солнца Земля, если расстояние между ними около 150 Гм, а масса Солнца $1,97 \cdot 10^{30}$ кг?

10.7. Определить среднюю плотность Земли, если известно, что ее радиус 6,37 Мм, а ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$.

10.8. Определить массу Земли, если известно, что искусственный спутник, запущенный на высоту 1 Мм, имеет период обращения 106 мин.

10.9. Вычислить среднюю скорость вращения Луны по орбите, считая среднее расстояние ее от Земли 384 Мм, а массу Земли $5,96 \cdot 10^{24}$ кг.

10.10. Найти вторую космическую скорость, т. е. наименьшее значение скорости, при которой ракета может удалиться от Земли, выйдя за пределы ее поля тяготения.

10.11. На сколько уменьшится масса тела на вершине Эльбруса ($h = 6$ км) по сравнению с ее значением на уровне моря?

10.12. На какой высоте ускорение силы тяжести вдвое меньше его значения на поверхности Земли?

10.13. Какое ускорение получает Земля под действием силы притяжения ее Солнцем?

10.14. Космическая ракета, ставшая искусственной планетой, движется вокруг Солнца с периодом обращения 450 сут. Найти среднее удаление от Солнца искусственной планеты, если известно, что среднее удаление от Солнца планеты Земля 149,5 Гм, а ее период обращения 365 сут 6 ч 9 мин 10 с. Считать орбиты планет круговыми.

10.15. Чему равна линейная скорость движения Земли вокруг Солнца в перигелии, если наименьшее и наибольшее расстояния от Земли до Солнца соответственно $r_1 = 147$ Гм и $r_2 = 152$ Гм, а средняя скорость движения Земли по орбите $\langle v \rangle = 29,8$ км/с?

10.16. Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы тело массой $5 \cdot 10^3$ кг, находящееся на поверхности Земли, отправить в межпланетное пространство. Сопротивлением воздуха пренебречь.

10.17. Известно, что по мере увеличения радиуса орбиты скорость искусственного спутника Земли уменьшается. Означает ли это, что при запуске спутника на орбиты большего радиуса двигатели ракеты должны совершать меньшую работу? Почему?

10.18. Найти давление в центре жидкой планеты, радиус которой R , если образующая ее жидкость несжимаема и имеет плотность ρ .

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

§ 11. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Основное уравнение кинетической теории газов (уравнение Клаузиуса):

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_0 \rangle,$$

где p — давление газа, n — концентрация молекул, $\langle E_0 \rangle$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

Средняя энергия молекулы:

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i — сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы. Для молекул с жесткой связью между атомами i совпадает с числом ее степеней свободы¹, k — постоянная Больцмана, T — термодинамическая температура газа.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT.$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где V , m и M — объем, масса и молярная масса газа, R — молярная газовая постоянная.

Давление смеси газов (закон Дальтона):

$$p = \sum_{i=1}^z p_i,$$

где p_i — парциальное давление i -го компонента смеси, z — число компонентов.

Средняя квадратичная, средняя арифметическая и наивероятнейшая скорости молекул:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

¹ Во всех задачах §§ 11—14, если это не будет специально оговорено, газ считать идеальным, молекулы газа — жесткими, объемными.

Распределение Максвелла:

$$dN(v) = N \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_0 v^2 / 2kT} 4\pi v^2 dv,$$

где $dN(v)$ — число молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v+dv$, N — общее число молекул, m_0 — масса молекулы.

Барометрическая формула:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}(h-h_0)},$$

где p и p_0 — давление газа на высоте h и h_0 .

Распределение Больцмана:

$$n = n_0 e^{-\frac{(E-E_0)}{kT}},$$

где n_0 и E_0 — концентрация и потенциальная энергия частиц на высоте h_0 .

Основное уравнение кинетической теории газов

11.1. Микроскопическая пылинка углерода обладает массой 0,1 нг. Определить, из скольких атомов она состоит.

11.2. Радоновые ванны, применяемые для лечения, содержат $1,8 \cdot 10^6$ атомов радона в воде объемом 1,0 дм³. На сколько молекул воды приходится один атом радона в лечебной ванне?

11.3. Сколько частиц (атомов и молекул) находится в азоте массой 1,0 г, если степень диссоциации азота 7,0%?

11.4. Сколько атомов ртути содержится в воздухе объемом 1,0 м³ в помещении, зараженном ртутью, при температуре 20°C, если давление насыщенного пара ртути при этой температуре 133 мПа?

11.5. Какова длина ребра куба, содержащего $1,0 \cdot 10^6$ молекул идеального газа при нормальных условиях?

11.6. Газ нагревается в открытом сосуде при нормальном атмосферном давлении от 27°C до 327°C. Какое приращение получит при этом число молекул в единице объема газа?

11.7. В сосуде объемом 1 дм³ содержится некоторый газ при температуре 17°C. Найти приращение давления газа, если вследствие утечки газа из него выйдет 10^{21} молекул.

11.8. В сосуде объемом 3,0 дм³ находится гелий массой 4,0 мг, азот массой 70 мг и $5,0 \cdot 10^{21}$ молекул водорода. Каково давление смеси, если температура ее 27°C?

11.9. В закрытом кубическом сосуде, ребро которого $l = 1,0$ см, имеется N молекул воздуха. Стенки кубика таковы, что молекулы воздуха, попав на стенку, остаются на ней в течение $\tau = 1,0 \cdot 10^{-2}$ с. Найти число молекул воздуха, находящихся на стенках, если температура сосуда 300 К.

11.10. Для дальней космической связи используется спутник объемом 100 м³, наполненный воздухом при нормальных усло-

виях. Метеорит пробивает в его корпусе отверстие площадью $S=1,0 \text{ см}^2$. Найти время, через которое давление внутри спутника изменится на 1,0%. Температуру газа считать неизменной.

11.11. В герметически закрытом сосуде смешали поровну кислород и гелий, а затем в стенке сосуда сделали отверстие. Каков состав молекулярного пучка, выходящего из него?

11.12. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения молекул водорода, содержащихся в 1,0 моль при 18°C .

11.13. Найти среднюю энергию молекул, содержащихся в азоте массой 7,0 г при температуре 16°C . Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая на долю вращательного? Колебательные степени свободы молекул азота не возбуждаются.

11.14. В сосуде объемом $2,0 \text{ дм}^3$ находится газ под давлением $0,50 \text{ МПа}$. Чему равна средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа?

11.15. Кислород массой 12 г находится при температуре 700°C , при этом 40% молекул диссоциировано на атомы. Чему равна средняя энергия тепловое движение частиц? Колебательные степени свободы молекул кислорода не возбуждаются.

11.16. У газа, состоящего из четырехатомных (объемных) молекул, при температуре $1,00 \cdot 10^3 \text{ К}$ возбуждаются все степени свободы (включая колебательные). Найти среднюю энергию молекулы такого газа. Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения?

11.17. До какой максимальной температуры может нагреваться из-за трения о воздух поверхность самолета, который летит со скоростью, близкой к скорости звука? Считать, что воздух состоит из жестких молекул азота. Температуру окружающего воздуха принять равной -10°C .

Газовые законы

11.18. Некоторый идеальный газ испытывает сначала изобарное расширение, а затем изотермическое сжатие. Изобразить эти процессы в координатах p, T и V, T .

11.19. Изобразить графически зависимость плотности ρ некоторой массы идеального газа от давления p при изотермическом процессе.

11.20. Определенная масса идеального газа изохорно нагревается, а затем изобарно сжимается. Изобразить графики этих процессов в координатах: а) p, V ; б) p, T ; в) ρ, T .

11.21. Некоторая масса идеального газа изобарно нагревается, а затем после изотермического сжатия и изохорного охлаждения возвращается в исходное состояние. Изобразить эти процессы в координатах p, V и p, T .

11.22. На рисунке 11.1 изображены процессы, происходящие с идеальным газом определенной массы. Изобразить эти процессы в координатах p, V и p, T .

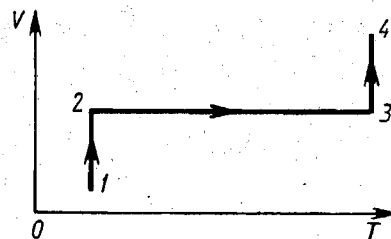


Рис. 11.1

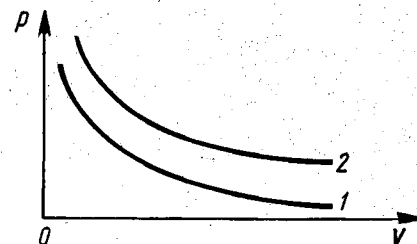


Рис. 11.2

11.23. На рисунке 11.2 изображены изотермы для двух идеальных газов с одинаковыми массами m и различными молярными массами M , находящихся при одинаковой температуре. Выяснить, какая изотерма относится к газу с большей молярной массой. Каким будет результат в случае одинаковых молярных масс M и различных масс газа m ?

11.24. Изобразить графически в координатах p, T две изохоры, соответствующие разным массам одного и того же газа, занимающим одинаковые объемы.

11.25. Определить характер изменения давления (рис. 11.3, а), объема (рис. 11.3, б) и температуры (рис. 11.3, в) идеального газа некоторой массы в процессах, представленных на графиках.

11.26. При проведении опыта Торричелли внизу барометрической трубки образовался пузырек воздуха объемом $2,0 \text{ мм}^3$. Каким стал объем пузырька, если он поднялся и находится на расстоянии 1,0 см от уровня ртути в трубке?

11.27. Объем пузырька воздуха по мере всплывания его со дна озера на поверхность увеличивается в 3 раза. Какова глубина озера?

11.28. В шаре диаметром 20 см находится воздух массой 7,0 г. До какой температуры можно нагреть этот шар, если максимальное давление, которое выдерживают стенки шара, $0,30 \text{ МПа}$? Молярная масса воздуха $M=0,029 \text{ кг/моль}$.

11.29. При нагревании газа некоторой массы на 1 К при постоянном давлении объем газа увеличивается на $1/300$ часть его первоначального значения. Определить начальную температуру газа.

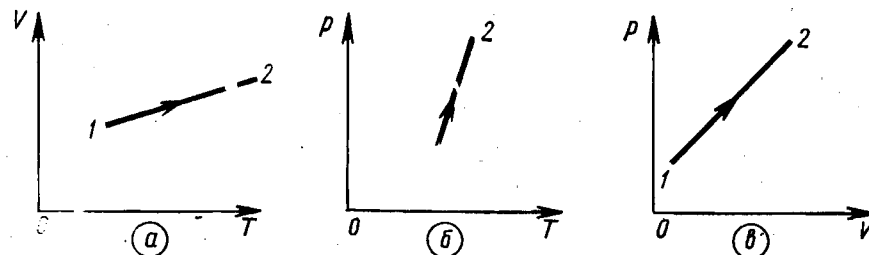


Рис. 11.3

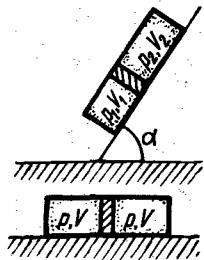


Рис. 11.4

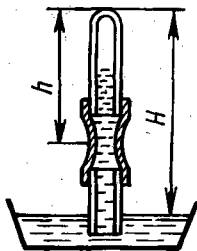


Рис. 11.5

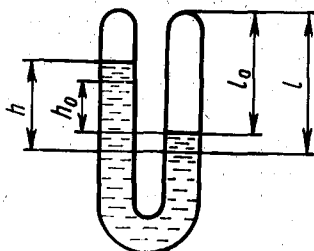


Рис. 11.6

11.30. Открытая стеклянная колба вместимостью $0,40 \text{ дм}^3$, содержащая воздух, нагрета до 127°C . Какой объем займет вода в колбе при остывании ее до 27°C , если после нагревания ее горлышко опустить в воду?

11.31. Сколько качаний n поршневого насоса надо сделать, чтобы накачать пустую камеру футбольного мяча объемом $V = 2,5 \text{ дм}^3$ до давления, превышающего атмосферное в 4 раза? За каждое качание насос захватывает из атмосферы воздух объемом $V_0 = 200 \text{ см}^3$. Температуру мяча считать постоянной.

11.32. Сколько качаний поршневого насоса потребуется для того, чтобы давление в баллоне объемом $V_0 = 1,5 \text{ дм}^3$ уменьшить в $k = 100$ раз? Объем камеры насоса $V = 100 \text{ см}^3$. Изменением температуры при откачивании газа пренебречь.

11.33. В одном баллоне вместимостью 15 дм^3 находится газ под давлением $0,2 \text{ МПа}$, а в другом — тот же газ под давлением 1 МПа . Баллоны, температура которых одинакова, соединены трубкой с краном. Если открыть кран, то в обоих баллонах устанавливается давление $0,4 \text{ МПа}$. Какова вместимость второго баллона?

11.34. Внутри трубы, наполненной воздухом и закрытой с обоих концов, может скользить без трения плотно прилегающий к стенкам трубы поршень массой $m = 4,0 \text{ кг}$ и площадью $2,0 \text{ дм}^2$. Определить отношение объемов воздуха в трубе по обе стороны от поршня при ее соскальзывании по наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол $\alpha = 60^\circ$ (рис. 11.4). Коэффициент трения между трубой и наклонной плоскостью $\mu = 0,25$. Известно, что в горизонтально лежащей трубе поршень занимает среднее положение, при этом давление воздуха в трубе $p = 1,25 \text{ кПа}$. Температура воздуха в трубе постоянна.

11.35. Будет ли давать правильные показания чашечный ртутный барометр (рис. 11.5), если часть его трубки (ниже уровня ртути) сделана из мягкой резины?

11.36. В чашечный ртутный барометр попал воздух, в результате чего при нормальных условиях барометр показывает $98,6 \text{ кПа}$. Расстояние от уровня ртути в трубке до запаянного конца ее $10,0 \text{ см}$. Каково истинное значение атмосферного давления, если при температуре 20°C барометр показывает $97,3 \text{ кПа}$? Тепловым расширением ртути и трубки пренебречь.

11.37. U-образная трубка заполнена водой, оба конца которой запаяны (рис. 11.6). Из одного колена воздух удален, давление воздуха в другом колене при температуре 20°C равно нормальному атмосферному. Какой будет разность уровней воды в коленах, если трубку нагреть до 100°C ? Считать, что $l_0 = 15 \text{ м}$.

11.38. В двух сосудах одинакового объема находятся гелий и аргон, массы которых равны. Во сколько раз давление гелия больше, чем аргона, если температуры газов одинаковы?

11.39. Давление в цилиндре паровой машины объемом 20 дм^3 после открывания клапана уменьшилось на $\Delta p = 0,81 \text{ МПа}$. Какова масса пара, выпущенного из цилиндра? Температуру пара считать 100°C .

11.40. Газометр вмещает при нормальных условиях углекислый газ массой $0,50 \text{ кг}$. Определить массу находящегося в газометре углекислого газа, если термометр показывает 17°C , а манометр — $93,3 \text{ кПа}$.

11.41. Плотность газа при давлении $0,20 \text{ МПа}$ и температуре 7°C равна $2,41 \text{ кг/м}^3$. Какова масса 1 моль этого газа?

11.42. В барометрическую трубку при нормальных условиях попал воздух, вследствие чего барометр показал давление $0,10 \text{ МПа}$. Какова плотность воздуха над ртутью?

11.43. Газ находится при температуре 20°C и давлении $0,50 \text{ МПа}$. Какое давление потребуется для того, чтобы увеличить плотность газа в 2 раза, если температура его будет доведена до 80°C ?

11.44. Определить массу 1 моль смеси, состоящей из кислорода массой $8,0 \text{ г}$ и углекислого газа массой 22 г .

11.45. Приняв, что воздух по массе состоит из 76% азота, 23% кислорода и 1% аргона, найти массу 1 моль воздуха.

11.46. Найти объем смеси, состоящей из азота массой $2,8 \text{ кг}$ и кислорода массой $3,2 \text{ кг}$ и имеющей температуру 17°C и давление $0,40 \text{ МПа}$.

11.47. В баллоне вместимостью 14 дм^3 находится смесь гелия с кислородом массой 64 г при температуре 7°C и давлении $0,12 \text{ МПа}$. Найти массу гелия и массу кислорода в смеси.

11.48. Определить плотность смеси, состоящей из гелия массой $8,0 \text{ г}$ и аргона массой $4,0 \text{ г}$, при температуре 17°C и давлении $0,10 \text{ МПа}$.

11.49. Гремучим газом называется смесь, состоящая из одной части водорода и восьми частей кислорода. Определить плотность гремучего газа при нормальных условиях.

Распределения Максвелла и Больцмана. Барометрическая формула

11.50. Из ядра атома радия вылетают α -частицы ($M = 0,004 \text{ кг/моль}$) со скоростью $15,3 \text{ Мм/с}$. При какой температуре атомы гелия имели бы такую же среднюю квадратичную скорость?

11.51. Полная кинетическая энергия молекул многоатомного газа, масса которого 20 г, равна 3,2 кДж. Найти среднюю квадратичную скорость молекул этого газа.

11.52. Каковы средняя квадратичная и средняя арифметическая скорость пылинки, находящейся в воздухе во взвешенном состоянии при температуре 17°C, если масса ее 0,10 нг?

11.53. Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул водорода больше средней квадратичной скорости молекул водяных паров при той же температуре?

11.54. При какой температуре молекулы аргона имеют такую же среднюю квадратичную скорость, как молекулы гелия при 100 К?

11.55. В сосуде объемом 1 дм³ находится газ массой 6 г под давлением 80 кПа. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа.

11.56. Какова средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа, если известно, что плотность его 30 г/м³, а давление, оказываемое им на стенки сосуда, 3,6 кПа?

11.57. В объеме 1,0 см³ при давлении 20 кПа находится $5,0 \cdot 10^{19}$ молекул гелия. Определить среднюю квадратичную скорость молекул при этих условиях.

11.58. Определить среднюю арифметическую скорость молекул газа, если известно, что средняя квадратичная скорость их 600 м/с.

11.59. Какова наивероятнейшая скорость молекул метана и гелия при температуре 127°C?

11.60. Пользуясь распределением Максвелла и понятием относительной скорости u как отношения скорости молекул v к наивероятнейшей скорости v_* , получить то же распределение в приведенном виде:

$$dN(u) = N \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 du.$$

11.61. Какая часть молекул азота при температуре 7°C обладает скоростями в интервале от 500 до 510 м/с?

11.62. Какая часть молекул кислорода обладает скоростями, отличающимися от наивероятнейшей не больше чем на 10 м/с, при температурах 0 и 300°C?

11.63. Определить отношение числа молекул водорода, обладающих скоростями в интервале от 2,0 до 2,01 км/с, к числу молекул, обладающих скоростями от 1,0 до 1,01 км/с, если температура водорода 0°C.

11.64. Определить высоту горы, если давление на ее вершине равно половине давления на уровне моря. Температуру считать всюду одинаковой и равной 0°C.

11.65. На поверхности Земли барометр показывает 101 кПа. Каково будет показание барометра при подъеме его на Останкинскую телевизионную башню, высота которой 540 м? Температуру считать всюду одинаковой и равной 7°C.

11.66. При подъеме вертолета на некоторую высоту барометр, находящийся в его кабине, изменил свое показание на 11 кПа. На какой высоте летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал 0,1 МПа? Температуру воздуха считать всюду одинаковой и равной 17°C.

11.67. Каковы давление и число молекул в единице объема воздуха на высоте 2,0 км над уровнем моря? Давление на уровне моря 101 кПа, а температура 10°C. Изменением температуры с высотой пренебречь.

11.68. Пылинки массой 1 аг взвешены в воздухе. Определить толщину слоя воздуха, в пределах которого концентрация пылинок различается не более чем на 1,0%. Температуру воздуха во всем объеме считать одинаковой и равной 27°C.

11.69. У поверхности Земли молекул водорода почти в $1,0 \cdot 10^6$ раз меньше, чем молекул азота. На какой высоте число молекул водорода будет равно числу молекул азота? Среднюю температуру атмосферы принять равной 0°C.

§ 12. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Средняя длина свободного пробега молекул газа:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n},$$

где d — эффективный диаметр молекул, n — концентрация молекул.

Среднее число столкновений одной молекулы в единицу времени:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle.$$

Общее число столкновений всех молекул в единице объема за единицу времени:

$$z = \frac{1}{2} \langle z \rangle n.$$

Число молекул, ударяющихся за единицу времени в единичную площадку, которая помещена в газе:

$$z_0 = \frac{n \langle v \rangle}{4}.$$

Масса определенного компонента газа dm , диффундирующая за время dt через площадку dS , расположенную перпендикулярно оси X :

$$dm = -D \frac{dp}{dx} dS dt,$$

где D — коэффициент диффузии, $\frac{dp}{dx}$ — градиент плотности. Знак

минус обусловлен тем, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности.

Коэффициент диффузии:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle.$$

Сила внутреннего трения dF между двумя слоями площадью dS , движущимися с различными скоростями:

$$dF = -\eta \frac{dv}{dx} dS,$$

где η — динамическая вязкость, $\frac{dv}{dx}$ — градиент скорости течения газа в направлении, перпендикулярном к площадке dS . Знак минус означает, что сила трения, действующая на более быстро движущиеся слои, направлена против скорости.

Динамическая вязкость:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho,$$

где ρ — плотность газа.

Количество теплоты, переносимое за время dt через площадку dS , расположенную перпендикулярно оси X :

$$dQ = -\kappa \frac{dT}{dx} dS dt,$$

где κ — теплопроводность, $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры. Знак минус показывает, что перенос внутренней энергии происходит в направлении убывания температуры.

Теплопроводность:

$$\kappa = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho c_v,$$

где c_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме¹.

Средняя длина свободного пробега молекул.

Число столкновений

12.1. В межзвездном пространстве содержится 1 молекула в объеме 15 см^3 . Какова средняя длина свободного пробега молекул, если предположить, что окружающие молекулы являются молекулами водорода?

12.2. Чему равна средняя длина свободного пробега молекул гелия, если среднее расстояние между ними 4 нм?

12.3. Средняя длина свободного пробега молекул воздуха при нормальном давлении 62,1 нм. Определить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха при сверхвысоком вакууме (1,33 нПа). Температуру считать одной и той же.

12.4. В баллоне вместимостью 10 дм^3 находится гелий массой 2,0 г. Определить среднюю длину свободного пробега молекул гелия.

12.5. Какова плотность разреженного кислорода, если средняя длина свободного пробега его молекул 1,0 см?

12.6. Определить среднюю квадратичную скорость молекул аргона, находящегося под давлением 0,10 МПа, если известно, что средняя длина свободного пробега его молекул 0,10 мкм.

12.7. Какое давление нужно создать в колбе диаметром 0,10 м, содержащей азот при температуре 20°C , чтобы получить вакуум?

12.8. Можно ли считать состояние газа при давлении 133 мкПа высоким вакуумом, если он создан в колбе диаметром $l = 0,50 \text{ м}$, содержащей кислород при 0°C ?

12.9. В сферическом сосуде диаметром $l = 0,40 \text{ м}$ находится азот при температуре 20°C . При каком давлении молекулы азота практически не будут сталкиваться друг с другом?

12.10. В сферическом сосуде вместимостью $2,0 \text{ дм}^3$ находится водород. При какой плотности водорода молекулы его практически не будут сталкиваться друг с другом?

12.11. Каково среднее значение промежутка времени между двумя последовательными столкновениями молекул водорода при давлении 13,3 Па и температуре 100°C ?

12.12. Средняя длина свободного пробега молекул гелия при нормальных условиях 230 нм. Найти среднюю продолжительность свободного пробега молекул гелия при давлении 1,0 мПа и температуре 17°C .

12.13. Сколько столкновений за 1,0 с испытывают молекулы углекислого газа, находящегося при нормальных условиях?

12.14. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа 900 м/с, а средняя длина свободного пробега при этих условиях 4,0 мкм. Определить среднее число столкновений молекул этого газа за 1 с.

12.15. Средняя длина свободного пробега молекул водорода при некотором давлении и температуре 21°C равна 90 нм. В результате изотермического процесса давление газа увеличилось в 3 раза. Найти среднее число столкновений молекул водорода за 1 с в конце процесса.

12.16. При температуре 47°C и некотором давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода 40 нм. В результате изотермического сжатия объем газа уменьшился в 2 раза. Определить среднее число столкновений молекул кислорода за 1,0 с в конце сжатия.

12.17. В сосуде вместимостью $1,0 \text{ дм}^3$ находится азот при температуре 7°C и давлении 0,20 МПа. Определить число столкновений молекул азота в этом сосуде за 1,0 с.

12.18. Катод рентгеновской трубки имеет вид диска площадью $1,0 \text{ см}^2$. Определить число молекул воздуха, ударяющихся за 1,0 с о катод при температуре 17°C и давлении 13,3 мПа.

¹ См. с. 94.

12.19. Как изменится число ударов молекул одноатомного газа о стенку баллона площадью 1 м^2 за 1 с , если давление газа увеличится в 4 раза, в случае 1) изотермического и 2) изохорного процессов?

Диффузия, вязкость и теплопроводность газов

12.20. Средняя длина свободного пробега молекул гелия при нормальных условиях $0,23 \text{ мкм}$. Определить коэффициент диффузии гелия при этих условиях.

12.21. Определить коэффициент диффузии кислорода при нормальных условиях.

12.22. Каков коэффициент диффузии водорода при некоторых условиях, если коэффициент диффузии гелия при этих условиях $92 \text{ мм}^2/\text{с}$?

12.23. Коэффициент диффузии кислорода при нормальных условиях $14,1 \text{ мм}^2/\text{с}$. Определить, каким будет коэффициент диффузии при температуре 50°C , если нагревание газа происходит при постоянном объеме.

12.24. Во сколько раз изменится коэффициент диффузии двухатомного газа при уменьшении давления в 2 раза в результате изотермического расширения?

12.25. Коэффициент диффузии углекислого газа при нормальных условиях $10 \text{ мм}^2/\text{с}$. Определить динамическую вязкость углекислого газа при этих условиях.

12.26. Вычислить коэффициент диффузии и динамическую вязкость азота при давлении $0,10 \text{ МПа}$ и температуре 7°C .

12.27. Для гелия динамическая вязкость при температуре 0°C равна $16,3 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$. Определить диаметр молекул гелия.

12.28. Найти динамическую вязкость воздуха при температуре 100°C и нормальном давлении, если при нормальных условиях она равна $17,2 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$.

12.29. При какой температуре динамическая вязкость азота равна динамической вязкости водорода при температуре 19°C ?

12.30. Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами, радиусы которых равны 5 и $5,5 \text{ см}$, заполнено кислородом при температуре 0°C . Определить, выше какого давления динамическая вязкость кислорода не будет зависеть от давления.

12.31. Определить теплопроводность хлора, если известно, что динамическая вязкость для него при этих условиях равна $12,9 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$.

12.32. Определить теплопроводность аргона при нормальных условиях.

12.33. Теплопроводность трехатомного газа с жесткими (объемными) молекулами равна $1,45 \text{ сВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а коэффициент диффузии при тех же условиях $10 \text{ мкм}^2/\text{с}$. Определить число молекул в газе объемом $1,0 \text{ м}^3$ при этих условиях.

12.34. Найти предельное значение давления, ниже которого теплопроводность воздуха, заключенного между стенками сосуда

Дюара, начинает зависеть от давления. Расстояние между стенками $l=6,0 \text{ мм}$. Диаметр молекулы воздуха принять равным $0,30 \text{ нм}$. Температура газа 17°C .

§ 13. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Первое начало термодинамики может быть записано в виде:

$$\delta Q = dU + \delta A',$$

где δQ — количество теплоты, подводимое к системе, dU — приращение внутренней энергии системы, $\delta A'$ — работа, совершаемая системой против внешних сил.

Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \frac{m}{M} C_V T,$$

где C_V — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме:

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении:

$$C_p = C_V + R.$$

Работа, совершаемая газом:

$$A' = \int p dV.$$

Работа при изотермическом процессе:

$$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона):

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ — показатель адиабаты.

Работа при адиабатном процессе:

$$A' = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2).$$

Уравнение политропического процесса:

$$pV^n = \text{const},$$

где $n = \frac{C - C_p}{C - C_V}$ — показатель политропы, C — молярная теплоемкость газа при политропическом процессе.

Работа при политропическом процессе:

$$A' = \frac{m}{M} \cdot \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right).$$

Уравнение Бернулли для среды с переменной плотностью (газы при больших скоростях течения) при не слишком больших перепадах высот:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = 0,$$

где v_1 и v_2 — скорости газа в двух произвольных точках 1 и 2

линии тока. Интеграл $\int_1^2 \frac{dp}{\rho}$ зависит от вида процесса изменения состояния газа между этими точками.

Для адиабатного течения идеального газа (уравнение Бернулли):

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{R}{M} (T_2 - T_1) = 0.$$

Теплоемкость

13.1. Найти молярные теплоемкости C_V и C_p , а также их отношения γ для идеального газа, состоящего из молекул: а) одноатомных; б) двухатомных с жесткими молекулами; в) двухатомных с упругими молекулами; г) трехатомных с жесткими (объемными) молекулами; д) трехатомных с упругими (объемными) молекулами.

13.2. Удельная теплоемкость при постоянном давлении некоторого газа 970 Дж/(кг·К), молярная масса его равна 0,03 кг/моль. Определить, каким числом степеней свободы обладают молекулы этого газа.

13.3. Разность между удельными теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме некоторого газа равна 260 Дж/(кг·К). Определить молярную массу данного газа.

13.4. Плотность некоторого газа при нормальных условиях $\rho = 1,25$ кг/м³. Отношение удельных теплоемкостей 1,4. Определить удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа.

13.5. Определить γ для газовой смеси, состоящей из водорода массой 4,0 г и углекислого газа массой 22,0 г.

13.6. Отношение удельных теплоемкостей смеси, состоящей из нескольких молей азота и 5 молей аммиака, 1,35. Определить число молей азота в смеси.

13.7. Определить удельные теплоемкости c_p и c_v смеси, состоящей из азота в количестве 1 моль, метана — 4 моль и аргона массой 8,0 г.

13.8. Воздух содержит 25% водяного пара. Считая сухой

воздух двухатомным газом с молярной массой 0,029 кг/моль, определить удельную теплоемкость влажного воздуха при постоянном давлении.

13.9. Найти удельные теплоемкости воздуха c_p и c_v , считая, что в его составе находится: азот — 76%, кислород — 23%, аргон — 1,0%.

13.10. Количество теплоты, необходимое при нагревании газа на 25 К при постоянном давлении, равно 500 Дж, а количество теплоты, выделяемое при охлаждении того же газа на 75 К при постоянном объеме, 1,07 кДж. Определить γ данного газа.

13.11. Найти молярную теплоемкость идеального газа в процессе, при котором температура газа: 1) пропорциональна квадрату его объема; 2) обратно пропорциональна его объему. Теплоемкость газа в количестве 1 моль при постоянном объеме равна C_V .

Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу

13.12. Многоатомный газ, находящийся под давлением 0,10 МПа при температуре 7°C, был изобарно нагрет на 40 К, в результате чего он занял объем 8,0 дм³. Определить количество теплоты, переданное газу.

13.13. В закрытом сосуде вместимостью 20 дм³ содержится одноатомный газ, плотность которого 0,20 кг/м³. Количество теплоты, необходимое для нагревания газа на 80 К при этих условиях, равно 997 Дж. Найти молярную массу этого газа.

13.14. Газ, для которого $c_p/c_v = 4/3$, находится под давлением $p = 0,20$ МПа и занимает объем $V_1 = 3,0$ дм³. В результате изобарного нагревания объем его увеличился в 3 раза. Определить количество теплоты, переданное газу.

13.15. Закрытый баллон вместимостью 0,80 м³ заполнен азотом под давлением 2,3 МПа при температуре 20°C. Количество теплоты, переданное газу, равно 4,6 МДж. Определить температуру и давление газа в конце процесса.

13.16. Двухатомный газ находится в закрытом баллоне вместимостью 5,0 дм³ под давлением 0,20 МПа. После нагревания давление в баллоне увеличилось в 4 раза. Определить количество теплоты, переданное газу.

13.17. В цилиндре диаметром $d = 40$ см содержится двухатомный газ объемом $V = 80$ дм³. На сколько следует увеличить нагрузку поршня при подводе количества теплоты $Q = 84$ Дж, чтобы поршень не пришел в движение?

13.18. Изобразить для идеального газа примерные графики изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного процессов на диаграммах: а) p, V ; б) p, T ; в) V, T .

13.19. Двухатомный газ, находящийся при температуре 250°C, сжимают изотермически так, что его объем уменьшается

в 3 раза. Затем газ расширяется адиабатно до начального давления. Найти температуру газа в конце адиабатного расширения.

13.20. Двухатомный газ, находящийся при температуре 22°C , адиабатно сжимают так, что его давление возрастает в 2 раза, а затем охлаждают при постоянном объеме до начального давления. Вычислить конечную температуру газа.

13.21. В каком случае идеальный газ при одинаковом увеличении объема совершает большую работу: при изобарном, изотермическом или адиабатном процессе?

13.22. В каком случае над идеальным газом при одинаковой степени его сжатия $n = \frac{V_1}{V_2}$ совершается большая работа: при изобарном, изотермическом или адиабатном процессе?

13.23. Кислород массой 64 г нагрели на 20 К при постоянном давлении. Найти работу, совершенную газом.

13.24. Газ, занимающий объем 22 дм^3 под давлением $0,10 \text{ МПа}$, изобарно нагрет от 20 до 100°C . Определить работу, совершенную газом.

13.25. Расширяясь, трехатомный газ, состоящий из жестких (объемных) молекул, совершает работу 245 Дж. Какое количество теплоты было подведено к газу, если он расширяется: 1) изобарно; 2) изотермически?

13.26. Во время изобарного сжатия при начальной температуре 100°C объем кислорода массой 10 кг уменьшился в 1,25 раза. Определить работу, совершенную газом, и количество отведенной теплоты.

13.27. На рисунке 13.1 даны графики пяти изопроцессов в координатах p, V . Как изменяется внутренняя энергия идеального газа в ходе каждого из процессов?

13.28. Изобразить для идеального газа примерные графики: а) изохорного, изобарного и адиабатного процессов на диаграмме U, T ; б) изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного процессов на диаграммах U, V и U, p .

13.29. Идеальный газ некоторой массы переходит из состояния a в состояние b двумя различными способами: 1 и 2 (рис. 13.2). Одинаковы ли в каждом процессе: а) работа, совершаемая газом; б) приращение его внутренней энергии; в) сообщенное газу количество теплоты?

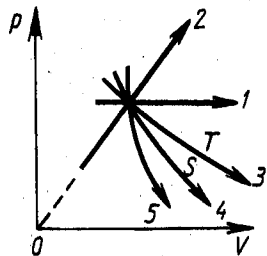


Рис. 13.1

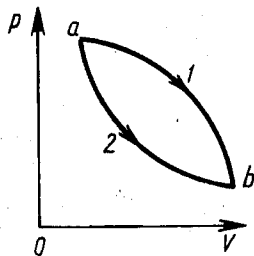


Рис. 13.2

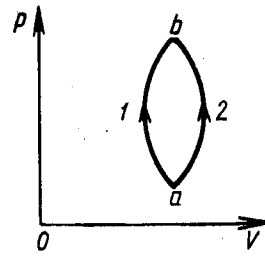


Рис. 13.3

13.30. Некоторое количество идеального газа переходит из состояния a в состояние b с помощью двух различных процессов: 1 и 2 (рис. 13.3). При каком процессе работа, совершенная газом, будет положительной, а при каком — отрицательной?

13.31. Аргон массой 10,0 г нагрет на 100 К при постоянном давлении. Определить количество теплоты, переданное газу, приращение внутренней энергии и работу, совершенную газом.

13.32. Какая доля количества теплоты, подведенного к идеальному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение его внутренней энергии и какая — на работу при расширении в случае: а) одноатомных; б) двухатомных с жесткими молекулами; в) трехатомных с жесткими (объемными) молекулами газов?

13.33. Одноатомный газ, находящийся под давлением $0,30 \text{ МПа}$, изобарно расширяется от $2,0$ до $7,0 \text{ дм}^3$. Определить работу, совершенную газом, и приращение его внутренней энергии.

13.34. При изобарном расширении некоторой массы трехатомного газа с жесткими (объемными) молекулами, находящегося под давлением $0,2 \text{ МПа}$, внутренняя энергия его изменилась на 4,8 кДж. Найти приращение объема газа.

13.35. Углекислый газ массой 4,4 г под давлением $0,10 \text{ МПа}$ при температуре 87°C адиабатно сжимают до $1/20$ его начального объема. Определить конечную температуру и давление газа, приращение внутренней энергии и работу, совершенную газом.

13.36. Какой объем сжатого двухатомного газа нужно израсходовать для совершения работы 250 кДж, если при адиабатном расширении объем его увеличивается в 2 раза при начальном давлении $0,18 \text{ МПа}$?

13.37. При уменьшении объема кислорода от $V_1 = 20 \text{ дм}^3$ до $V_2 = 10 \text{ дм}^3$ его давление возросло от $p_1 = 0,10 \text{ МПа}$ до $p_2 = 0,25 \text{ МПа}$. Каково приращение внутренней энергии газа?

13.38. Гелий массой 20 г, заключенный в цилиндре под поршнем, очень медленно переводят из состояния 1 ($p_1 = 0,41 \text{ МПа}$, $V_1 = 32 \text{ дм}^3$) в состояние 2 ($p_2 = 1,6 \text{ МПа}$, $V_2 = 9,0 \text{ дм}^3$). Какой наибольшей температуры достигает газ при этом процессе, если график зависимости давления от объема — прямая линия (рис. 13.4)?

13.39. Идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 3 с помощью изобарного и изотермического процессов (см. рис. 6 к ответу 11.18). Положительны или отрицательны: работа A , совершенная газом, и количество теплоты Q , полученное газом, в каждом из указанных процессов?

13.40. В результате адиабатного расширения кислорода массой 3,2 г, находящегося при температуре 20°C , давление уменьшилось от $1,0$ до $0,38 \text{ МПа}$. Определить: 1) во сколько раз увеличился объем; 2) температуру в конце процесса; 3) какое количество теплоты необходимо сообщить газу при постоянном

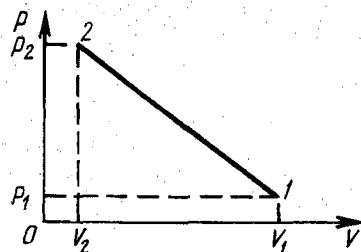


Рис. 13.4

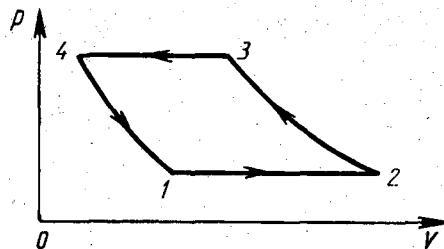


Рис. 13.5

объеме, для того чтобы температура снова повысилась до 20°C ; 4) какое при этом установится давление.

13.41. В цилиндре под поршнем находится двухатомный газ в количестве 1 моль при температуре 27°C . Сначала газ расширяется адиабатно так, что объем его увеличивается в 5 раз, а затем сжимается изотермически до первоначального объема. Определить совершенную газом работу.

13.42. Воздух массой 0,50 кг изотермически сжимают от давления 0,10 до 1,0 МПа, при этом совершается работа 103 кДж. В конце сжатия при постоянном давлении к воздуху подводится количество теплоты, равное отведенному ранее при изотермическом сжатии. Определить температуру и объем в конце каждого из этих процессов.

13.43. Идеальный газ переходит из состояния 1 (p_1, V_1, T_1) в состояние 2 (p_2, V_2, T_2). Затем из состояния 2 газ медленно адиабатно переходит в состояние 3 (p_3, V_3, T_3). Известно, что при переходе 2—3 газ совершает работу, равную количеству теплоты, переданной ему при переходе 1—2. Показать, что $T_3 = T_1$. Изобразить процессы 1—2 и 2—3 на диаграмме V, T .

13.44. Цикл, соответствующий процессу, происходящему с идеальным газом некоторой массы, состоит из двух изобар и двух изотерм (рис. 13.5). Изобразить цикл в координатах (T, p) , (p, T) и (U, V) и выяснить, на каких участках работа, совершаемая газом, $A' < 0$; а на каких $A' > 0$.

13.45. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из двух изотерм и двух изохор (рис. 13.6). Изобразить этот процесс в координатах (p, T) , (p, T) и (U, V) и выяснить, как изменяется внутренняя энергия газа на каждом участке.

13.46. Если идеальный газ совершает процесс 1—2—3 (рис. 13.7), то ему сообщается количество теплоты Q . Какое количество теплоты передается газу в процессе 1—4—3?

13.47. Трехатомный газ с жесткими (объемными) молекулами объемом 20 дм³, находящийся под давлением 0,10 МПа, переводят в состояние, при котором его объем увеличивается в 2 раза, а давление в 3 раза. Определить количество теплоты, необходимое газу для этого перехода, изменение его внутренней энергии, а также работу, совершенную газом, при условии, что переход осуществляется по пути: 1) 1—3—2; 2) 1—2; 3) 1—4—2 (рис. 13.8).

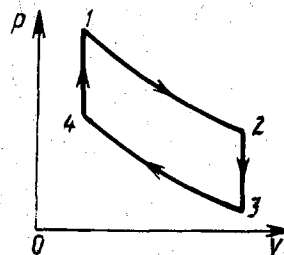


Рис. 13.6

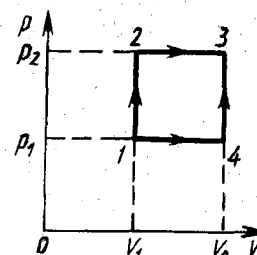


Рис. 13.7

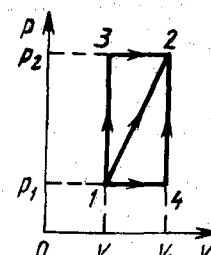


Рис. 13.8

13.48. Газ объемом 50 дм³, находящийся под давлением 0,30 МПа, нагревают при постоянном объеме до тех пор, пока давление его увеличится в 2 раза, после чего газ изотермически расширяется до начального давления, и, наконец, его охлаждают при постоянном давлении до начального объема. Определить работу, совершенную газом в каждом из этих процессов.

13.49. Волейбольный мяч массой $m = 200$ г и объемом $V = 8,0$ дм³ накачан до избыточного давления $p = 20$ кПа. Мяч был подброшен на высоту $h = 20$ м и после падения на твердый грунт подскочил почти на ту же высоту. Оценить максимальную температуру воздуха в мяче в момент удара о грунт. Температура наружного воздуха $T = 300$ К.

13.50. В вертикальном цилиндре имеется идеальный одноатомный газ в количестве ν моль. Цилиндр закрыт сверху поршнем массой m и площадью S . Вначале поршень удерживался неподвижно, газ в цилиндре занимал объем V_0 и имел температуру T_0 . Затем поршень освободили, и после нескольких колебаний он пришел в состояние покоя. Пренебрегая в расчетах всеми силами трения, а также теплоемкостью поршня и цилиндра, найти температуру и объем газа при новом положении поршня. Вся система теплоизолирована. Атмосферное давление равно p_0 .

13.51. В расположенном горизонтально цилиндре с одной стороны от закрепленного поршня находится идеальный газ в количестве 1 моль. В другой части цилиндра — вакуум. Пружина, расположенная между поршнем и стенкой цилиндра (рис. 13.9), находится в недеформированном состоянии. Цилиндр теплоизолирован от окружающей среды. Поршень освобождают, и после установления равновесия объем, занимаемый газом, увеличивается вдвое. Как изменяются температура газа и его давление? Теплоемкости цилиндра, поршня и пружины пренебрежимо малы.

13.52. Цилиндрическое углубление закрыто свободно движущимся поршнем А, под которым осталась камера вместимостью 38 см³, заполненная воздухом при нормальных условиях (рис. 13.10). На поршень падает груз В массой 1,5 кг с высоты 0,50 м. Определить температуру воздуха после сжатия его упавшим грузом, считая сжатие адиабатным процессом.



Рис. 13.9

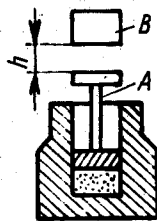


Рис. 13.10

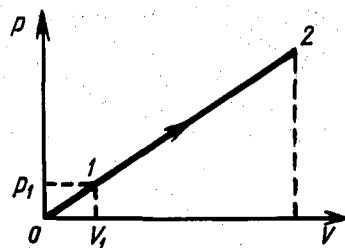


Рис. 13.11

13.53. Неподвижный баллон содержит углекислый газ объемом 20 дм^3 под давлением $3,0 \text{ МПа}$ при температуре 27°C . С какой скоростью начнет двигаться баллон, если открыть выпускной вентиль? Масса баллона 20 кг .

13.54. В результате политропического сжатия от давления $0,100$ до $0,800 \text{ МПа}$ объем $18,0 \text{ м}^3$ воздуха уменьшился в 6 раз. Определить показатель политропы и работу, совершаемую газом при сжатии.

13.55. Азот массой $1,0 \text{ кг}$, находящийся при температуре 700°C и давлении $2,5 \text{ МПа}$, политропически расширяется до давления $0,10 \text{ МПа}$. Определить температуру в конце процесса и работу, совершаемую газом. Показатель политропы $n=1,18$.

13.56. Идеальный двухатомный газ в количестве 1 моль расширяется по политропе с показателем $n=1,2$, при этом температура газа уменьшается на $1,0 \text{ К}$. Определить: 1) молярную теплоемкость газа при этом процессе; 2) количество теплоты, полученное газом; 3) работу, совершаемую газом.

13.57. Газ совершает политропический процесс (рис. 13.11), в результате которого объем его возрастает в 5 раз. Начальный объем газа V_1 , начальное давление p_1 . Определить: 1) показатель политропы n ; 2) молярную теплоемкость C газа; 3) приращение внутренней энергии ΔU ; 4) работу A' , совершаемую газом.

Элементы газодинамики

13.58. Определить максимальную скорость воздуха при адиабатном истечении из сосуда большого объема в вакуум. Температура воздуха в сосуде равна 293 К .

13.59. Температура движущегося воздуха равна 273 К . Определить значение температуры торможения для потока воздуха, обладающего скоростью 500 м/с . Температурой торможения газового потока называется температура, которую имел бы газ после его адиабатного торможения до полной остановки.

13.60. При какой температуре можно получить атомы ксенона со скоростью $v=1,20 \text{ км/с}$ при адиабатном истечении струи газа в вакуум? Молярная масса ксенона $M=0,131 \text{ кг/моль}$.

13.61. Найти скорость адиабатного истечения струи идеаль-

ного газа из сосуда через малое отверстие в вакуум. Скорость распространения звука в газе $v_{\text{зв}}$.

13.62. Определить температуру и скорость струи гелия, вытекающей адиабатно из баллона, при давлении $p_2=0,20 \text{ МПа}$. Давление и температура в баллоне соответственно равны $p_1=2,0 \text{ МПа}$ и $T_1=27^\circ\text{C}$.

13.63. Адиабатное истечение в вакуум продуктов сгорания топлива в двигателе космической ракеты происходит при температуре $3,00 \cdot 10^3 \text{ К}$. Показатель адиабаты $\gamma=1,2$. Средняя молярная масса продуктов сгорания $M=0,030 \text{ кг/моль}$. Определить, во сколько раз стартовая масса ракеты m_0 должна превышать ее конечную массу m , чтобы ракета могла достичь первой космической скорости v_1 . Влиянием силы тяжести и трением о воздух на участке ускорения ракеты пренебречь.

13.64. Скорость адиабатного истечения продуктов сгорания из сопла космической ракеты равна $2,0 \text{ км/с}$, температура 900 К . Определить температуру в камере сгорания и предельный КПД. Считать, что топливо полностью сгорает и из сопла вытекает углекислый газ.

13.65. Космический корабль движется со скоростью v в идеальном газе, температура которого T . В какой точке на поверхности корабля температура газа будет максимальной и чему она равна?

13.66. В камеру сгорания реактивного двигателя поступает в секунду водород массой m и необходимое для полного сгорания количество кислорода. Площадь сечения выходного отверстия сопла двигателя S , давление в этом сечении p , абсолютная температура T . Определить силу тяги двигателя.

13.67. Определить силу тяги реактивного двигателя, в котором используют в качестве горючего водород и в качестве окислителя жидкий кислород. Секундный расход водорода $24,0 \text{ кг/с}$. Разность температур в камере сгорания и в струе адиабатно вытекающего газа $4,80 \cdot 10^3 \text{ К}$.

§ 14. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, переданное рабочим телом холодильнику.

КПД идеального цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

Холодильный коэффициент холодильной машины:

$$\varepsilon = \frac{Q_2'}{A},$$

где Q_2' — количество теплоты, отнятое от охлаждаемого тела за цикл, A — работа, совершенная над газом за цикл.

Приращение энтропии при переходе системы из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Термодинамическая вероятность Ω (статистический вес) и энтропия S связаны соотношением

$$S = k \ln \Omega.$$

Тепловые двигатели и холодильные машины

14.1. На рисунке 14.1 даны диаграммы двух циклов Карно: 1—2—3—4—1 и 1'—2'—3—4—1'. В каком из циклов машина будет иметь больший КПД?

14.2. На рисунке 14.2 даны диаграммы двух циклов Карно: 1—2—3—4—1 и 1—2—3'—4'—1. В каком из циклов машина будет иметь больший КПД?

14.3. В результате кругового процесса газ совершил работу 2,0 кДж и передал холодильнику количество теплоты 8,4 кДж. Определить КПД цикла.

14.4. Газ, совершающий цикл Карно, $3/4$ теплоты, полученной от нагревателя, отдает холодильнику. Температура холодильника 0°C . Определить температуру нагревателя.

14.5. Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в 3 раза выше абсолютной температуры холодильника. Какую долю теплоты, получаемой за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

14.6. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, имеет температуру нагревателя 227°C , температуру холодильника 127°C . Во сколько раз нужно увеличить температуру нагревателя, чтобы КПД машины увеличился в 3 раза?

14.7. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно, 427°C , холодильника 227°C , причем холодильник этой тепловой машины служит нагревателем другой тепловой машины. У какой из машин КПД больше и во сколько раз, если разность температур нагревателя и холодильника у обеих машин одинакова?

14.8. КПД паровой машины составляет 50% от КПД идеальной тепловой машины, которая работает по циклу Карно в том же интервале температур. Температура пара, поступающего из котла в паровую машину, 227°C , температура в конденсаторе 77°C . Определить мощность паровой машины, если она за 1 ч потребляет уголь массой 200 кг с теплотворной способностью 31 МДж/кг.

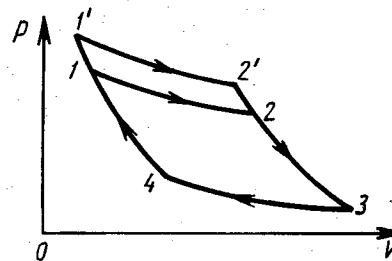


Рис. 14.1

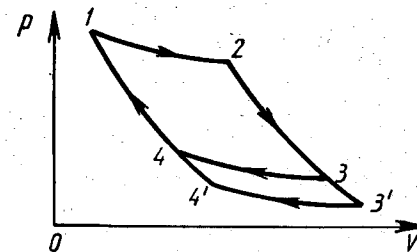


Рис. 14.2

14.9. Тепловую машину, работающую по циклу Карно с КПД $\eta = 20\%$, используют при тех же условиях как холодильную машину. Найти ее холодильный коэффициент.

14.10. Какую работу совершают внешние силы в идеальной холодильной машине, работающей по обратному циклу Карно, чтобы отнять у холодильника, температура которого -10°C , 100 кДж теплоты? Температура охлаждаемой воды 10°C .

14.11. В идеальной холодильной машине, работающей по обратному циклу Карно, совершается перенос теплоты от тела с температурой -20°C к воде, имеющей температуру 10°C . Определить, какое количество теплоты будет отнято от охлаждаемого тела за один цикл, если известно, что данная холодильная машина приводится в действие с помощью тепловой машины, которая работает в интервале температур $202-107^\circ\text{C}$ и передает за каждый цикл холодильнику 504 кДж теплоты.

14.12. Холодильник мощностью P за время t превратил в лед n литров воды, которая первоначально имела температуру $t^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты выделилось в комнате за это время?

14.13. Домашний холодильник потребляет ток средней мощностью 40 Вт. Какое количество теплоты выделится в комнате за сутки, если холодильный коэффициент $\varepsilon = 9$?

14.14. Вычислить КПД цикла Карно, совершаемого трехатомным газом, состоящим из жестких (объемных) молекул, если при адиабатном расширении объем его увеличивается от 6 до 7 дм^3 .

14.15. Двухатомный газ совершает цикл Карно. Определить КПД цикла, если известно, что на каждый моль этого газа при его адиабатном сжатии затрачивается работа 2,0 кДж. Температура нагревателя 127°C .

14.16. Наименьший объем газа, совершающего цикл Карно, 12 дм^3 . Определить наибольший объем, если объем газа в конце изотермического расширения 60 дм^3 , в конце изотермического сжатия — 19 дм^3 .

14.17. Газ, совершающий цикл Карно, КПД которого 25%, при изотермическом расширении производит работу 240 Дж. Какова работа, совершаемая газом при изотермическом сжатии?

14.18. На рисунке 14.3 показаны диаграммы V, T двух кру-

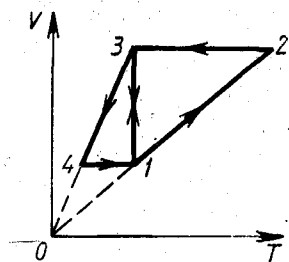


Рис. 14.3

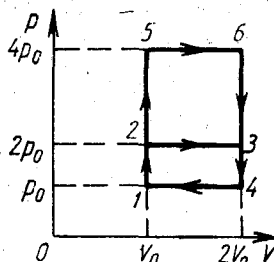


Рис. 14.4

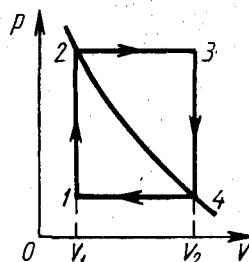


Рис. 14.5

говых процессов. В каком из них газ совершает большую работу: в процессе 1—2—3—1 или в процессе 1—3—4—1?

14.19. Двухатомный газ совершает цикл Карно, причем при изотермическом расширении его объем увеличивается в 2 раза, а при последующем адиабатном расширении он производит работу 300 кДж. Определить работу, совершаемую газом за один цикл.

14.20. На рисунке 14.4 показаны два замкнутых термодинамических цикла, проведенных с идеальным одноатомным газом: 1—2—3—4—1 и 1—5—6—4—1. У какого из циклов КПД выше и во сколько раз?

14.21. Идеальный газ в количестве 1 моль совершает цикл Карно, состоящий из двух изохор и двух изобар (рис. 14.5). Температура газов в точках 1 и 3 равна соответственно T_1 и T_3 . Определить работу, совершаемую газом за цикл, если известно, что точки 2 и 4 лежат на одной изотерме.

14.22. Идеальный двухатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление в 3 раза больше наименьшего, а наибольший объем в 5 раз больше наименьшего. Определить КПД цикла.

14.23. Воздух массой 1,0 кг совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар (рис. 14.6). Начальный объем газа 80 дм³, давление изменяется от 1,2 до 1,4 МПа, температура $t_3 = 150^\circ\text{C}$. Определить: 1) координаты пересечения изохор и изобар; 2) работу, совершаемую газом за один цикл; 3) количество теплоты, полученной от нагревателя за цикл; 4) КПД цикла; 5) какой КПД имел бы цикл Карно, изотермы которого соответствовали бы наибольшей и наименьшей температурам рассматриваемого цикла.

14.24. Идеальный трехатомный газ из жестких (объемных) молекул нагревают при постоянном объеме так, что его давление возрастает в 2 раза. После этого газ изотермически расширяется до начального давления и затем изобарно сжимается до начального объема. Определить КПД цикла.

14.25. Идеальный трехатомный газ с жесткими (объемными) молекулами нагревают при постоянном объеме так, что его давление возрастает в 2 раза. После этого газ адиабатно расширяется

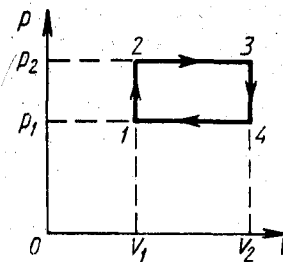


Рис. 14.6

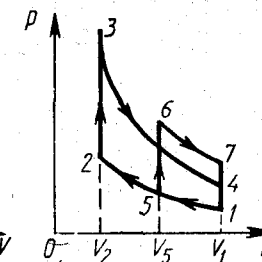


Рис. 14.7

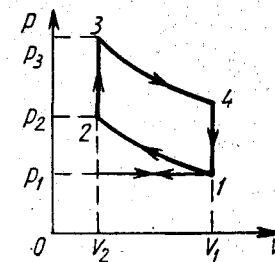


Рис. 14.8

до начального давления и затем изобарно сжимается до начального объема. Определить КПД цикла, совершаемого газом.

14.26. На рисунке 14.7 приведены диаграммы двух циклов 1—2—3—4—1 и 1—5—6—7—1, состоящих из двух изохор и двух адиабат. В обоих циклах рабочее тело (идеальный газ с показателем адиабаты γ) получает от нагревателя одинаковое количество теплоты Q , но имеет разные степени сжатия n ($n = \frac{V_1}{V_2}$, где V_1 — максимальный объем, а V_2 — минимальный объем рабочего тела). Как влияет степень сжатия на КПД теплового двигателя?

14.27. На рисунке 14.8 изображен цикл карбюраторного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, состоящий из двух изохор 1—4 и 2—3 и двух адиабат 1—2 и 3—4. Степень сжатия горючей смеси, которую можно считать идеальным газом с показателем адиабаты γ , $n = \frac{V_1}{V_2}$. Определить КПД цикла.

14.28. В цикле двигателя внутреннего сгорания, рассмотренном в предыдущей задаче, горючая смесь, которую можно считать двухатомным газом с жесткими молекулами, сжимается до объема 2,0 дм³. Ход и диаметр поршня равны соответственно 40 и 15 см. Определить КПД цикла.

14.29. Сравнить КПД двух тепловых машин, циклы работы которых изображены на рисунке 14.9. Первый цикл состоит из двух адиабат 1—2 и 3—4, изобары 2—3 и изохоры 4—1, второй — из двух адиабат 1—2 и 3—4 и двух изобар 2—3 и 4—1. Участки 2—3 у обоих циклов одинаковы.

14.30. На рисунке 14.10 изображен цикл четырехтактного двигателя Дизеля, состоящий из изобары 2—3, изохоры 4—1 и двух адиабат 1—2 и 3—4. Степень адиабатного сжатия $n = V_1/V_2$, а степень изобарного расширения $k = V_3/V_2$. Определить КПД цикла. Рабочее вещество — идеальный газ с показателем адиабаты γ .

14.31. На рисунке 14.11 изображен цикл проточного воздушнореактивного двигателя, состоящего из двух адиабат 1—2 и 3—4 и двух изобар 4—1 и 2—3. Степень повышения давления при адиабатном сжатии $\delta = p_2/p_1$. Определить КПД цикла. Рабочее вещество — идеальный газ с показателем адиабаты γ .

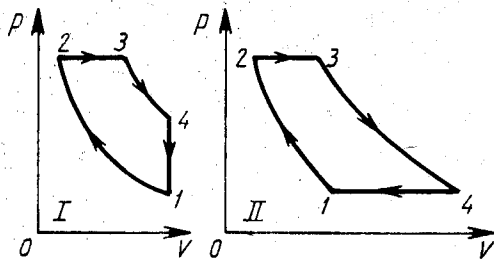


Рис. 14.9

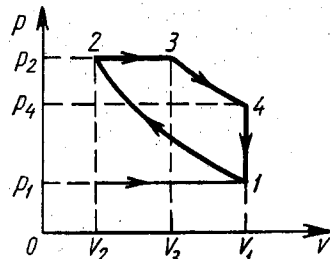


Рис. 14.10

14.32. Тепловая машина работает по циклу (рис. 14.12), состоящему из изохоры 2—3, изобары 3—1 и политропы 1—2, на которой давление газа и объем связаны соотношением $p = \alpha V$, где α — постоянная величина. Найти КПД тепловой машины, если в качестве рабочего тела в ней используется одноатомный идеальный газ. Отношение максимальной температуры в цикле к минимальной равно 4.

Энтропия

14.33. До какой температуры нужно довести кислород массой 4,0 кг, находящийся при температуре 227°C, не меняя его объема, чтобы уменьшить энтропию кислорода на 1,31 кДж/К?

14.34. При нагревании аргона массой 8,0 г его абсолютная температура увеличилась в 2 раза. Определить приращение энтропии при 1) изохорном и 2) изобарном нагревании.

14.35. Гелий в количестве 1 моль, изобарно расширяясь, увеличил свой объем в 4 раза. Найти приращение энтропии при этом расширении.

14.36. Два объема газа, находившегося первоначально при одной и той же температуре и давлении, сжимают от значения V до $V/2$: один изотермически, а другой адиабатно. В каком случае конечная температура будет больше? Будет ли иметь место изменение энтропии при обоих процессах?

14.37. Как будет выглядеть цикл Карно на диаграмме S, T , если выразить состояние системы через энтропию S и абсолютную температуру T вместо давления и объема?

14.38. В результате изотермического сжатия воздуха объемом 887 дм³, находящегося при температуре 30°C и начальном давлении 0,10 МПа, энтропия его уменьшилась на 673 Дж/К. Определить объем воздуха в конце процесса.

14.39. Кислород и водород, имеющие равные массы, одинаково изотермически сжимают. Для какого газа приращение энтропии будет больше и во сколько раз?

14.40. Определить приращение энтропии углекислого газа массой 1,0 кг в процессе сжатия от давления 0,20 МПа при температуре 40°C до давления 4,5 МПа при температуре 253°C.

14.41. Вычислить приращение энтропии одного моля идеаль-

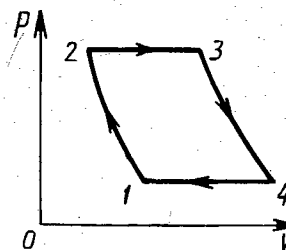


Рис. 14.11

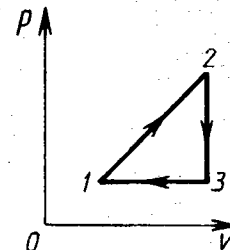


Рис. 14.12

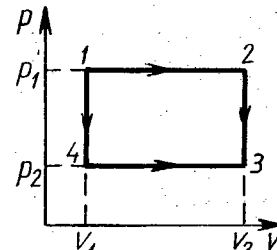


Рис. 14.13

ного газа при расширении его по политропе $pV^n = \text{const}$ от объема V_1 до объема V_2 .

14.42. Идеальный газ участвует в двух обратимых процессах 1—2—3 и 1—4—3 (рис. 14.13). Показать, что теплота, сообщенная газу в каждом из процессов, различна, а изменение энтропии одно и то же.

14.43. Кислород массой 1,0 кг при давлении 0,50 МПа и температуре 127°C, изобарно расширяясь, увеличивает свой объем в 2 раза, а затем сжимается изотермически до давления 4,0 МПа. Определить суммарное приращение энтропии.

14.44. Воздух массой 1,0 кг сжимают адиабатно так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при постоянном объеме давление возрастает в 1,5 раза. Определить приращение энтропии в этом процессе.

14.45. Определить приращение энтропии при смешении азота массой 3,0 кг и углекислого газа массой 2,0 кг. Температуры и давления газов до смешения одинаковы.

14.46. Два баллона с кислородом вместимостями 2,0 и 4,0 дм³ соединены трубкой с краном. Начальные температуры в обоих баллонах одинаковы и равны 27°C. Давление в первом баллоне 0,10 МПа, во втором 0,60 МПа. Найти приращение энтропии системы после того, как откроют кран, если вся система заключена в теплоизолирующую оболочку.

14.47. Два баллона с воздухом вместимостями 0,50 и 1,0 м³ соединены трубкой с краном. В первом баллоне находится воздух массой 3,0 кг при температуре 27°C, во втором — 5,0 кг при температуре 57°C. Найти приращение энтропии системы после открывания крана и достижения равновесного состояния. Стенки баллонов и трубка обеспечивают полную теплоизоляцию воздуха от окружающей среды.

14.48. Идеальный газ в количестве 1 моль изометрически расширяется так, что при этом происходит приращение энтропии на 5,75 Дж/К. Определить натуральный логарифм отношения термодинамических вероятностей начального и конечного состояний газа, а также отношение начального и конечного его давлений.

14.49. Энтропия термодинамической системы в некотором состоянии равна 3,18 мДж/К. Чему равен статистический вес этого состояния системы?

§ 15. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ЖИДКОСТИ

Уравнение Ван-дер-Ваальса для произвольной массы m газа:

$$\left(p + \frac{m^2 a}{M^2 V^2}\right) \left(V - \frac{m}{M} b\right) = \frac{m}{M} RT,$$

где a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса.

Связь критических параметров — молярного объема, давления и температуры газа с постоянными a и b Ван-дер-Ваальса:

$$V_{\text{мк}} = 3b, \quad p_{\text{к}} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{\text{к}} = \frac{8a}{27bR}.$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенных величинах для одного моля:

$$\left(\pi + \frac{3}{\omega^2}\right) (3\omega - 1) = 8\tau,$$

где $\pi = \frac{p}{p_{\text{к}}}$, $\omega = \frac{V_{\text{м}}}{V_{\text{мк}}}$, $\tau = \frac{T}{T_{\text{к}}}$.

Относительная влажность воздуха φ :

$$\varphi = \frac{p}{p_0},$$

где p — парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре (абсолютная влажность), p_0 — давление насыщенного пара при той же температуре.

Уравнение Клапейрона — Клаузиуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(v_2 - v_1)},$$

где v_1 и v_2 — удельные объемы вещества в двух состояниях, T и λ — температура и удельная теплота перехода вещества из 1 → 2.

Поверхностное натяжение:

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

где ΔE — изменение свободной энергии поверхностного слоя жидкости, ΔS — изменение площади этого слоя.

Добавочное давление, вызванное кривизной поверхности жидкости (формула Лапласа):

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

Высота поднятия жидкости в капиллярных трубках:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r},$$

где θ — краевой угол, ρ — плотность жидкости, r — радиус канала трубки.

Относительное изменение объема жидкости при нагревании:

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T,$$

где β — температурный коэффициент объемного расширения.

Относительное изменение объема жидкости при изменении давления:

$$\frac{\Delta V}{V} = -k \Delta p,$$

где k — коэффициент сжатия.

Плотность жидкости при температуре t :

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

где ρ_0 — плотность при 0°C .

Осмотическое давление раствора (формула Вант-Гоффа):

$$p = CRT,$$

где $C = \frac{m}{MV}$ — число молей растворенного вещества в единице объема раствора.

Реальные газы

15.1. Аргон массой 4,0 г занимает объем 0,10 дм³ под давлением 2,5 МПа. Найти температуру газа, считая его идеальным, реальным.

15.2. Каково давление углекислого газа при температуре 3°C , если его плотность при этой температуре 550 кг/м³?

15.3. Вычислить внутреннее давление воды, если известна постоянная a в уравнении Ван-дер-Ваальса.

15.4. Найти диаметр молекулы аргона по известной постоянной b в уравнении Ван-дер-Ваальса.

15.5. В баллоне вместимостью 22 дм³ находится азот массой 0,70 кг при температуре 0°C . Определить давление газа на стенки баллона, внутреннее давление газа и собственный объем молекул.

15.6. Объем кислорода массой 4,0 г увеличивается от 1,0 до 5,0 дм³. Рассматривая газ как реальный, найти работу внутренних сил при этом расширении.

15.7. Найти значения постоянных a и b для бензола (C_6H_6) в уравнении Ван-дер-Ваальса по известным для него значениям критических температуры $T_{\text{к}}$ и давления $p_{\text{к}}$.

15.8. Определить плотность воды в критическом состоянии по известной постоянной b в уравнении Ван-дер-Ваальса.

15.9. Найти плотность водорода в критическом состоянии по известным для него значениям критических температуры T_k и давления p_k .

15.10. Каково внутреннее давление углекислого газа в момент сжижения, если при этом его плотность 550 кг/м^3 , а также известны критические температура T_k и давление p_k ?

15.11. Какова масса воды, налитой в сосуд вместимостью 30 см^3 , при которой ее можно привести в критическое состояние путем нагревания запаянного сосуда с водой?

15.12. Найти критический объем кислорода в количестве 1 моль по известным для него значениям критических температуры T_k и давления p_k .

15.13. Определить диаметр молекулы кислорода по известным для него значениям критических температуры T_k и давления p_k .

15.14. Какова средняя длина свободного пробега молекул азота при нормальных условиях, если известна постоянная Ван-дер-Ваальса?

15.15. Определить среднюю длину свободного пробега молекул аргона при нормальных условиях, если для него известны критические температура T_k и давление p_k .

15.16. Водород находится при температуре 27°C и давлении $0,20 \text{ МПа}$. Считая известными для него критические температуру T_k и давление p_k , найти коэффициент диффузии водорода.

15.17. Давление газа в 12 раз больше его критического давления, объем равен половине критического объема. Используя уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенных величинах, определить, во сколько раз температура газа больше его критической температуры.

15.18. Сколько молекул водяного пара содержится в комнате вместимостью 150 м^3 при температуре 20°C и относительной влажности 30%?

15.19. Воздух объемом 1 м^3 находится при температуре 17°C и относительной влажности 50%. Какова масса выпавшей росы, если, не меняя температуру воздуха, уменьшить ее объем в 3 раза?

15.20. Найти массу влажного воздуха объемом $1,0 \text{ м}^3$ при температуре 29°C , относительной влажности 60% и нормальном атмосферном давлении.

15.21. Относительная влажность воздуха, находящегося в сосуде при температуре 20°C , равна 70%. На сколько изменится относительная влажность воздуха, если его нагреть до 100°C , уменьшив при этом объем в 2 раза?

15.22. В стакан налиты две несмешивающиеся жидкости: тетрахлорид углерода CCl_4 и вода. При нормальном атмосферном давлении CCl_4 кипит при $76,7^\circ\text{C}$, а вода при 100°C . При равномерном нагревании стакана в водяной бане кипение на границе раздела жидкостей начинается при температуре $65,5^\circ\text{C}$. Определить, какая из жидкостей быстрее выкипает при таком «погра-

ничном» кипении и во сколько раз. Давление насыщенных паров воды при $65,5^\circ\text{C}$ составляет $26,0 \text{ кПа}$.

15.23. Каково атмосферное давление, если вода кипит при температуре 95°C ? Удельные объемы воды и пара равны соответственно $1,04 \text{ дм}^3/\text{кг}$ и $1,67 \text{ м}^3/\text{кг}$.

15.24. В закрытом сосуде вместимостью $4,0 \text{ дм}^3$ находится вода массой $2,0 \text{ кг}$ при температуре 373 К . На сколько нужно повысить температуру системы, чтобы масса насыщенного пара, находящегося над водой, увеличилась на $1,6 \text{ г}$?

15.25. До какой температуры был нагрет насыщенный водяной пар, находящийся при температуре $t_1 = 50^\circ\text{C}$, если давление его увеличилось в 8 раз?

Жидкости

15.26. Сколько молекул содержится в воде объемом 1 м^3 ? Какова масса молекулы воды?

15.27. Вычислить объем, занимаемый молекулой воды, и ребро кубика, приходящегося на одну молекулу.

15.28. С какой силой втягивается внутрь воды ее молекула, которая находится на поверхности, если молекулярное (поверхностное) давление воды $1,0 \text{ ГПа}$?

15.29. Нижний край тонкой прямоугольной пластины приведен в соприкосновение с поверхностью жидкости. Чтобы оторвать пластину от жидкости, нужно подействовать силой $8,8 \text{ мН}$. Длина нижнего края пластины $6,0 \text{ см}$. Чему равно поверхностное натяжение жидкости?

15.30. Рамка с подвижной нижней перекладиной длиной 15 см затянута мыльной пленкой. Какую надо совершить работу против сил поверхностного натяжения, чтобы растянуть пленку на $4,0 \text{ см}$, если $\sigma = 45 \text{ мН/м}$?

15.31. Контур из проволоки диаметром $1,22 \text{ мм}$ имеет подвижную сторону AB (рис. 15.1). Определить, из какого материала изготовлен контур, если после затягивания его мыльной пленкой сторона AB осталась в равновесии. Поверхностное натяжение мыльного раствора 45 мН/м .

15.32. На какую высоту поднимается под действием капиллярных сил вода в образовавшихся в почве капиллярах диаметром $0,3 \text{ мм}$ и в стеблях ржи, имеющих средний диаметр пор 20 мкм ? Смачивание считать полным.

15.33. Определить работу, необходимую для превращения воды массой $1,0 \text{ г}$ в туман, т. е. для распыления ее в капельки диаметром $0,20 \text{ мкм}$.

15.34. Какое количество теплоты получает капля ртути, образовавшаяся при слиянии 64 капель радиусом $2,0 \text{ мм}$ каждая?

15.35. Фитиль поднимает воду на высоту $8,0 \text{ см}$. На какую высоту по тому же фитилю поднимается керосин?

15.36. Вычислить разность уровней воды в капиллярах диаметром $0,5$ и $1,0 \text{ мм}$, которые погружены в сосуд с водой. Ка-

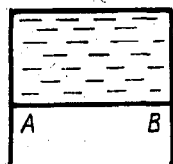


Рис. 15.1

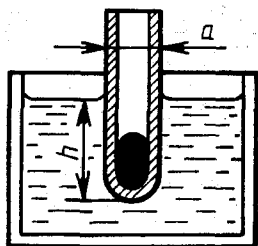


Рис. 15.2

кова была бы разность уровней, если бы капилляры погрузили в сосуд с ртутью?

15.37. В сосуд с водой при температуре 20°C опущен капилляр диаметром внутреннего канала $0,10$ мм. При нагревании воды до 70°C уровень воды в капилляре снизился на $3,2$ см. Определить поверхностное натяжение воды при температуре 70°C . Расширением стекла при нагревании пренебречь.

15.38. Для демонстрации поверхностного натяжения в проволочное сито, все проволочки которого покрыты тонким слоем парафина, наливают воду. До какой наибольшей высоты можно налить воду в такое сито, чтобы она не протекала сквозь отверстия в нем? Считать, что отверстия имеют круглую форму диаметром $0,20$ мм.

15.39. В дне стеклянного сосуда с ртутью имеется трещина. Высота столба ртути в сосуде $20,0$ см. Определить наибольшую ширину трещины, при которой ртуть еще не будет выливаться из сосуда.

15.40. С каким ускорением нужно поднимать капиллярную трубку с нависшей внизу капелькой воды, чтобы высота столба воды в трубке уменьшилась вдвое (часть жидкости вылилась)?

15.41. В стеклянный капилляр, опущенный в сосуд с водой, коаксиально вставлен другой капилляр, внутренний диаметр которого равен ширине зазора, образованного между капиллярами. В каком из капилляров уровень воды будет выше и во сколько раз? Толщиной стенок внутреннего капилляра пренебречь.

15.42. Определить диаметр капли золота в момент ее отрыва при плавлении золотой проволоки диаметром $0,20$ мм.

15.43. При плавлении серебряной проволоки диаметром $d = 2,0$ мм образовалось 12 капель серебра, при этом проволока укоротилась на $h = 205$ мм. Определить поверхностное натяжение жидкого серебра.

15.44. В жидкость на незначительную глубину опущена капиллярная трубка с диаметром канала $d = 2,0$ мм. Какова масса вошедшей в трубку жидкости, если поверхностное натяжение ее $\sigma = 43$ мН/м? Смачивание считать полным.

15.45. В открытом капилляре находится вода. Какова должна быть масса воды, чтобы при вертикальном положении ка-

пилляра в образовавшемся столбике нижний мениск был вогнутый, плоский, выпуклый? Внутренний диаметр капилляра $1,0$ мм. Смачивание считать полным.

15.46. В открытом капилляре, внутренний диаметр которого 1 мм, находится капля воды массой: 1) $m = 18$ мг; 2) $m = 23,3$ мг; 3) $m = 34$ мг. Определить радиусы кривизны верхнего R_1 и нижнего R_2 менисков в каждом из этих случаев при вертикальном положении капилляра.

15.47. В горизонтальном капилляре, внутренний диаметр которого $1,0$ мм, находится столбик глицерина. Какой должна быть длина столбика, чтобы при вертикальном положении капилляра глицерин из него не выливался? Смачивание считать полным.

15.48. В воронку налит спирт. Диаметр отростка воронки $0,40$ мм. До какой высоты нужно налить спирт, чтобы он начал по каплям выливаться из отростка?

15.49. Горизонтальный капилляр с внутренним диаметром $d = 2,0$ мм наполнен касторовым маслом. Длина столбика масла в капилляре $l = 4,0$ см. После того как капилляр был поставлен вертикально, из него вытекло масло массой $m = 77$ мг. Определить поверхностное натяжение масла. Смачивание считать полным.

15.50. Капилляр, внешний диаметр которого $3,0$ мм, запаян с одного конца. В запаянном конце имеется небольшой столбик ртути (рис. 15.2). Общая масса капилляра со ртутью $0,20$ г. Капилляр запаянным концом опущен в сосуд с водой. Определить глубину погружения капилляра в воду. Смачивание считать полным.

15.51. Определить массу спирта, поднятого между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами шириной 10 см, которые опущены в сосуд со спиртом.

15.52. Две вертикальные плоскопараллельные стеклянные пластины, находящиеся на расстоянии $d = 0,20$ мм друг от друга, погружены в жидкость. Определить плотность жидкости, если известно, что она поднялась между пластинами на высоту $h = 3,24$ см. Поверхностное натяжение жидкости $\sigma = 27$ мН/м. Смачивание считать полным.

15.53. Капля ртути массой $m = 1,36$ г введена между параллельными стеклянными пластинами. Какую силу нужно приложить для того, чтобы расплющить каплю до толщины $d = 0,10$ мм? Несмачивание считать полным.

15.54. Какова будет высота столба ртути в барометрической трубке диаметром $2,0$ мм, если атмосферное давление $0,10$ МПа? Каков должен быть минимальный диаметр барометрической трубки, чтобы поправка на поверхностное натяжение не превышала $13,3$ Па?

15.55. Барометрическая трубка с диаметром внутреннего сечения $d = 4,0$ мм заполнена ртутью и погружена открытым концом в широкий сосуд. Разность уровней ртути в трубке и сосуде $\Delta h = 75,6$ см. Чему равно атмосферное давление?

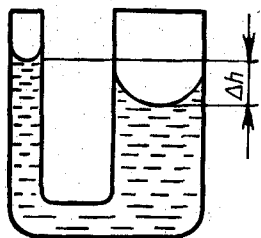


Рис. 15.3

15.56. Разность уровней воды в U-образном капилляре с диаметрами каналов $d_1 = 1,0$ мм и $d_2 = 3,0$ мм равна $\Delta h = 2,0$ см (рис. 15.3). Определить поверхностное натяжение воды. Смачивание считать полным.

15.57. Разность уровней ртути в U-образном капилляре предыдущей задачи 1 см. Определить поверхностное натяжение ртути. Несмачивание считать полным.

15.58. Вакуумный насос соединен с открытым U-образным ртутным манометром. Диаметры трубок манометра 0,25 и 4 см.

Какова разность давлений воздуха, если уровни ртути в трубках одинаковы? К какой из трубок должен быть присоединен для этого насос?

15.59. Плотность воздуха в пузырьке, находящемся на дне водоема глубиной 6 м, в 5 раз больше плотности воздуха при атмосферном давлении (при той же температуре). Определить радиус пузырька.

15.60. Определить добавочное давление и плотность воздуха внутри мыльного пузыря диаметром 1,0 см при температуре 20°C и атмосферном давлении 0,10 МПа. Поверхностное натяжение мыльной воды 45 мН/м.

15.61. Какую работу против сил поверхностного натяжения нужно совершить, чтобы, выдувая мыльный пузырь, увеличить его диаметр от 1,0 до 9,0 см?

15.62. Мыльный пузырь сферической формы выдувается так, что его радиус каждую секунду увеличивается на 1 см. Вычислить мощность, необходимую для выдувания пузыря радиусом 5 см.

15.63. Два мыльных пузыря радиусами 8 и 4 см выдуты на разных концах одной и той же трубки. Определить: 1) какой пузырь будет увеличиваться и какой уменьшаться, если их предоставить самим себе; 2) на сколько изменится радиус малого пузыря, если радиус большого изменился на 0,2 см.

15.64. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром 10 см? Процесс выдувания считать изотермическим.

15.65. Чему равен коэффициент объемного расширения керосина, если уровень его в одном колене сообщающихся сосудов, в которые он налит, 28 см, в другом — 30 см. Температура в одном колене 10°C , в другом — 80°C .

15.66. Найти плотность ρ_2 масла в гидравлической системе пресса при давлении p_2 , если плотность его при давлении p_1 была ρ_1 . Коэффициент сжатия равен k .

15.67. Коэффициент объемного расширения ртути $\beta = 0,18 \text{ мК}^{-1}$, а коэффициент сжатия $k = 39,5 \text{ нПа}^{-1}$. Каково приращение внешнего давления, при котором сохранится постоянным объем ртути при нагревании ее на 10 К?

15.68. Найти скорость падения капельки воды в воздухе, если ее радиус 5 мкм.

15.69. На дне цилиндрического сосуда, наполненного касторовым маслом до высоты 25 см, удерживается деревянный шарик диаметром 9,0 мм. Каков коэффициент вязкости касторового масла, если после того, как шарик отпустили, он всплыл на поверхность через 10 с? Плотность дерева принять равной 400 кг/м^3 .

15.70. Осмотическое давление раствора при температуре 27°C равно 0,2 МПа. Сколько частиц растворенного вещества находится в растворе объемом 1 дм³?

15.71. Для увеличения осмотического давления раствора нужно увеличить концентрацию раствора в 1,3 раза. На сколько градусов необходимо нагреть раствор, чтобы, не изменяя его концентрации, получить такое же увеличение осмотического давления? Начальная температура раствора 0°C .

15.72. Каково осмотическое давление раствора, если в нем на одну молекулу растворенного вещества приходится 800 молекул воды? Температура раствора 47°C . Диссоциация отсутствует.

15.73. Поваренная соль массой 3,0 г растворена в воде объемом 1,0 дм³ при температуре 30°C . Осмотическое давление при этих условиях оказалось 0,17 МПа. Какова степень диссоциации молекул соли?

15.74. Сосуд вместимостью 1,0 дм³, изготовленный из полупроницаемого вещества, наполнен водой, которая содержит поваренную соль массой 0,20 г, и опущен в воду. На сколько вследствие осмотического давления поднимется уровень в узкой трубке, вставленной в полупроницаемый сосуд, если при температуре 27°C все молекулы соли диссоциированы?

§ 16. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Относительное изменение длины при изменении температуры на ΔT :

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T,$$

где l — начальная длина, α — коэффициент линейного расширения.

Молярная теплоемкость химически простых твердых тел в классической теории теплоемкости (закон Дюлонга — Пти):

$$C = 3R.$$

Теплопередача из одной среды в другую через площадку dS за время dt :

$$Q = \alpha dT dS dt,$$

где α — коэффициент теплоотдачи.

16.1. Каково отношение длин железного и медного стержней при температуре 0°C , если разность их длин при любой температуре одна и та же?

16.2. Часы с металлическим маятником спешат на 8,0 с в сутки при температуре 3°C и отстают на 7,0 с в сутки при температуре 23°C . Найти коэффициент линейного расширения материала маятника и температуру, при которой часы будут идти правильно.

16.3. Найти зависимость периода свободных колебаний однородного твердого тела вокруг горизонтальной оси, не проходящей через его центр тяжести, от температуры.

16.4. Концы стального стержня сечением $5,0\text{ см}^2$ наглухо закреплены в двух стенах. Какова сила, действующая на стены при температуре 20°C , если при 10°C стержень находился в ненапряженном состоянии?

16.5. Алюминиевый чайник вместимостью $3,0\text{ дм}^3$ наполнен водой при температуре 5°C . Сколько воды вытечет из чайника при нагревании его до 70°C ? Задачу решить без учета и с учетом расширения материала чайника.

16.6. Латунная шкала ртутного барометра градуирована при температуре 0°C . Чему равно атмосферное давление, если при температуре 30°C барометр показывает давление $101,1\text{ кПа}$? Расширением стекла пренебречь.

16.7. Вычислить по классической теории теплоемкости удельные теплоемкости кристаллов: 1) алюминия; 2) меди; 3) платины.

16.8. Пользуясь классической теорией теплоемкости, вычислить удельные теплоемкости кристаллов KCl и CaCl_2 .

16.9. Толщина деревянной стены 10 см. Какой должна быть толщина кирпичной стены, чтобы она обладала такой же теплопроводностью, как деревянная?

16.10. Две пластины — медная и железная — одинаковой толщины вплотную прилегают друг к другу. Температура наружной поверхности медной пластинки 100°C , железной — 0°C . Найти температуру в месте соприкосновения пластин.

16.11. Сколько нужно сжечь каменного угля в печи, КПД которой 70%, чтобы восполнить потерю тепла за сутки через кирпичную стену площадью 20 м^2 и толщиной 0,20 м, если температура внутренней поверхности стены 20°C , а внешней 10°C ? Теплота сгорания угля 30 МДж/кг .

16.12. Электрическая печь мощностью $2,0\text{ кВт}$, внутренняя поверхность которой площадью 25 дм^2 , покрыта огнеупорным материалом толщиной 10 см. Коэффициент теплопроводности огнеупорного материала $0,80\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Какова температура наружной поверхности печи, если температура на внутренней ее поверхности 1200°C ?

16.13. Найти количество теплоты, теряемой за время $\tau = 1,0\text{ с}$ с площади $S = 1,0\text{ м}^2$ кирпичной стены толщиной $l = 51\text{ см}$, а также

температуру внутренней и внешней поверхностей стены, если температура в помещении $t_1 = 20^\circ\text{C}$, а температура наружного воздуха $t_4 = -20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи со стороны помещения $\alpha_1 = 12\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, а с наружной стороны стены $\alpha_2 = 6,0\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

16.14. Для уменьшения тепловых потерь стеной здания, рассмотренной в предыдущей задаче, и повышения температуры внутренней поверхности стены применена изоляция слоем пробки толщиной 5,0 см в двух вариантах: 1) слой пробки покрывает стену с внутренней стороны здания; 2) слой пробки покрывает стену с наружной стороны здания. Определить температуру кирпичной стены с внутренней стороны здания в обоих вариантах. Указать, какой из вариантов является наиболее выгодным и какой процент теплоты с его помощью можно сберечь.

16.15. Температура газов в топке парового котла $t_1 = 800^\circ\text{C}$, температура воды в котле $t_5 = 150^\circ\text{C}$. Стальные стенки котла толщиной $l_1 = 2,5\text{ см}$ покрыты с внутренней стороны слоем накипи толщиной $l_2 = 5,0\text{ мм}$. Какое количество теплоты передается за 1,0 с через поверхность котла площадью $1,0\text{ м}^2$? Коэффициент теплоотдачи со стороны газов $\alpha_1 = 46\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, а со стороны воды $\alpha_2 = 2,3\text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

16.16. Какой толщины слой сажи должен покрыть котел, описанный в предыдущей задаче, с наружной стороны, чтобы при отсутствии накипи с внутренней стороны котла количество теплоты, передаваемой котлом, осталось без изменения?

Фазовые переходы

16.17. Кусок льда находится в закрытом сосуде. На сколько надо повысить давление в сосуде, чтобы давление насыщенного пара, находящегося над льдом, повысилось на 5%? Температура в сосуде поддерживается постоянной и равной -20°C .

16.18. Определить температуру плавления льда при давлении $1,0\text{ МПа}$. Считать, что при изменении давления в пределах от 0,10 до $1,0\text{ МПа}$ плотность льда и воды и удельная теплота плавления постоянны.

16.19. Определить приращение энтропии при затвердевании ртути массой $1,0\text{ кг}$ при температуре затвердевания $-38,9^\circ\text{C}$.

16.20. Кусок льда массой $0,30\text{ кг}$, имевший первоначальную температуру 233 К , превращен в пар при температуре 373 К и атмосферном давлении. Определить приращение энтропии при этом процессе.

16.21. Струя водяного пара при температуре 100°C , направленная на глыбу льда массой $4,0\text{ кг}$ при температуре -20°C , растопила ее и нагрела получившуюся воду до 60°C . Найти приращение энтропии при этом процессе.

16.22. Определить приращение энтропии при плавлении льда в количестве 1 моль, если известно, что при увеличении внеш-

него давления на 10 МПа температура плавления льда изменяется на 1 К.

16.23. Каково приращение температуры куска льда, находящегося при нормальных условиях, если его адиабатно сжать до давления 10 МПа? Какая доля массы льда при этом расплавится?

16.24. Удельная теплота испарения бензола (C_6H_6) вблизи его тройной точки равна 0,43 МДж/кг. Чему равна его удельная теплота плавления при этих условиях, если температура тройной точки и равновесное давление пара в этой точке соответственно равны 6°C и 4,8 кПа? Для кривой возгонки в тройной точке $\frac{\Delta p}{\Delta T} = 324$ Па/К.

§ 17. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Закон Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1| |Q_2|}{r^2},$$

где r — расстояние между зарядами Q_1 и Q_2 , $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м — электрическая постоянная.

Модуль напряженности и потенциал поля точечного заряда:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}, \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Связь между напряженностью и потенциалом поля:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

Модуль напряженности и потенциал поля точечного диполя:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \Theta}, \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3},$$

где p — электрический момент диполя, r — радиус-вектор, проведенный из центра диполя в точку, где определяется E и φ , Θ — угол между векторами \vec{r} и \vec{p} .

Теорема Остроградского — Гаусса и циркуляция напряженности \vec{E} :

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = Q/\epsilon_0, \quad \oint (\vec{E} d\vec{r}) = 0.$$

Модуль напряженности электрического поля у поверхности проводника в вакууме:

$$E = \sigma/\epsilon_0,$$

где σ — поверхностная плотность зарядов на проводнике.

Вектор \vec{D} и теорема Остроградского — Гаусса для него:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \oint \vec{D} d\vec{S} = Q,$$

где \vec{P} — поляризованность диэлектрика, Q — алгебраическая сумма сторонних зарядов внутри замкнутой поверхности.

Для изотропных диэлектриков: $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$, $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$, где χ и ϵ — диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d.$$

Электрическая энергия уединенного заряженного проводника:

$$E = \frac{1}{2} \varphi Q.$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$E = \frac{1}{2} C U^2.$$

Объемная плотность энергии электрического поля:

$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}.$$

Закон Кулона

17.1. Два одноименных заряда $Q_1 = 0,7$ и $Q_2 = 1,3$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $r = 6,0$ см друг от друга. На каком расстоянии между ними нужно поместить третий заряд, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

17.2. Маятник состоит из металлического шарика, подвешенного на невесомой нерастяжимой непроводящей нити. Как изменится период его колебаний, если шарiku сообщить положительный заряд, а другой шарик, заряженный отрицательно, поместить внизу на одной вертикали с нитью подвеса маятника?

17.3. Два точечных заряда $Q = 1,1$ нКл каждый находятся на расстоянии $r = 17,0$ см. С какой силой и в каком направлении они действуют на единичный положительный заряд, находящийся на таком же расстоянии от каждого из них?

17.4. Одноименные заряды $Q_1 = 0,2$ мКл, $Q_2 = 0,5$ мКл и $Q_3 = 0,4$ мКл расположены в вершинах треугольника со сторонами $a = 4,0$ см, $b = 5,0$ см и $c = 7,0$ см (рис. 17.1). Определить модуль и направление силы, действующей на заряд Q_3 .

17.5. В центре квадрата расположен положительный заряд 250 нКл. Какой отрицательный заряд надо поместить в каждой вершине квадрата, чтобы система зарядов находилась в равновесии?

17.6. В вершинах и центре правильного треугольника со стороной 5,0 см расположены одинаковые положительные заряды 0,5 мКл каждый. Какая сила действует на отрицательный заряд 0,7 мКл, находящийся на продолжении высоты на расстоянии 7,0 см от вершины? Рассмотреть два случая решений.

17.7. В вершинах шестиугольника помещены одинаковые положительные заряды 10 нКл каждый. Какой отрицательный

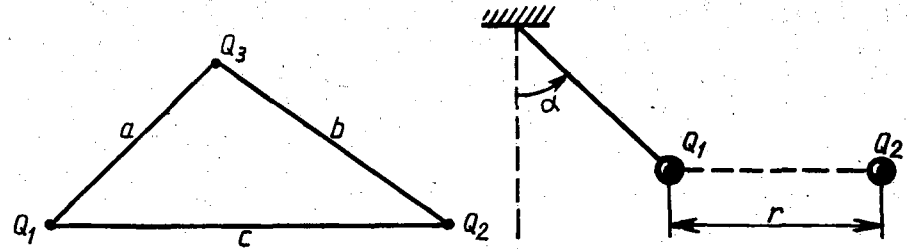


Рис. 17.1

Рис. 17.2

заряд надо поместить в центре шестиугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

17.8. Шарик массой m , несущий заряд Q , находится внутри гладкой сферы диаметром d . Какой заряд нужно поместить в нижней точке сферы для того, чтобы шарик находился: 1) в равновесии; 2) в устойчивом равновесии?

17.9. Шарик массой $m = 4$ г, несущий заряд $Q_1 = 278$ нКл, подвешен в воздухе на невесомой нерастяжимой непроводящей нити. При приближении к нему заряда Q_2 противоположного знака нить отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$ от вертикального направления (рис. 17.2). Найти модуль заряда Q_2 , если расстояние $r = 6$ см.

17.10. Два одинаковых шарика массой $m = 20$ мг каждый подвешены в воздухе на невесомых нерастяжимых непроводящих нитях длиной $l = 0,2$ м, закрепленных в одной точке подвеса. Один из шариков отвели в сторону и сообщили ему заряд Q , затем отпустили. После соприкосновения с другим шариком они разошлись так, что нити образовали угол $\alpha = 60^\circ$. Определить модуль заряда Q , сообщенного первому шарiku.

17.11. Три шарика массой $m = 5$ г каждый подвешены в воздухе на невесомых нерастяжимых непроводящих нитях длиной $l = 1$ м к одному крючку. При сообщении шарикам одинаковых зарядов Q шарики разошлись так, что угол между нитями стал $\alpha = 40^\circ$. Определить модуль заряда на шариках.

17.12. В модели атома Бора — Резерфорда электроны движутся по круговым орбитам вокруг положительно заряженного ядра. Определить скорость v и ускорение a электрона в атоме водорода, если радиус боровской орбиты $r = 52,9$ пм.

17.13. Заряженный шарик массой $m = 10$ г, подвешенный в воздухе на невесомой нерастяжимой непроводящей нити, образуя угол $\alpha = 45^\circ$ с вертикалью, движется с постоянной угловой скоростью $\omega = 10$ рад/с по окружности радиусом $r = 5$ см (рис. 17.3). В точке B находится другой неподвижный заряженный шарик, причем расстояние $AO = OB$. Найти модули зарядов шариков Q , считая их одинаковыми.

17.14. Заряженная частица массой m , несущая заряд Q_1 , дви-

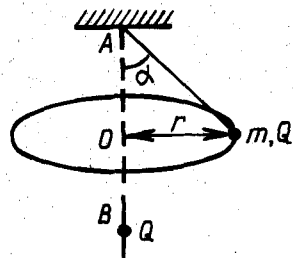


Рис. 17.3

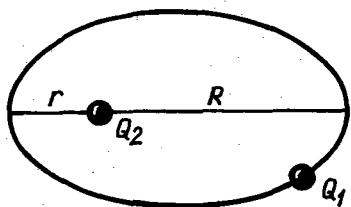


Рис. 17.4

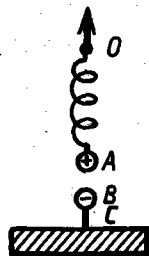


Рис. 17.5

жется вокруг закрепленного точечного заряда Q_2 по эллиптической орбите (рис. 17.4). Минимальное расстояние между зарядом и частицей Q_1 равно r , а максимальное R . Чему равен период T обращения частицы вокруг заряда Q_2 ?

17.15. Два шарика A и B массой $m=0,1$ кг каждый имеют одинаковые по модулю и противоположные по знаку заряды $Q=10$ мкКл. Шарик A подвешен на изолирующей пружине жесткостью $k=9,8$ Н/м над шариком B (рис. 17.5). В начальном положении сила кулоновского взаимодействия между шариками равна $4mg$. Верхний конец пружины медленно поднимают. На сколько надо переместить точку O , чтобы натяжение невесомой нерастяжимой непроводящей нити BC стало равным нулю?

17.16. На тонкой нити длиной $l=8$ см равномерно распределен заряд $Q_1=350$ мкКл, действующий силой $F=120$ мкН на точечный заряд Q_2 , находящийся на продолжении той же нити на расстоянии $r=6$ см от ее середины. Определить значение точечного заряда Q_2 , если вся система находится в воздухе.

17.17. Проволочному кольцу радиусом $R=5$ см сообщили заряд $Q_1=40$ нКл. С какой силой F_n будет растягиваться кольцо, если в его центре поместить одноименный заряд $Q_2=30$ нКл? Силы, растягивающие кольцо за счет собственного поля, не учитывать.

17.18. По тонкому проволочному кольцу радиусом $R=6$ см равномерно распределен заряд $Q=10$ нКл. Определить силу F , действующую на точечный заряд $Q_1=3$ нКл, находящийся на расстоянии $r=5$ см от центра кольца на прямой, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр.

17.19. Шарик массой $m=1,0$ г, несущий заряд $Q=90$ нКл, прикреплен к одному концу невесомой нерастяжимой непроводящей нити. Другой конец нити прикреплен к самой высокой точке кольца радиусом $R=5,0$ см, которое находится в вертикальной плоскости. Кольцо изготовлено из жесткой проволоки, диаметром которой можно пренебречь. На кольце равномерно распределен заряд $Q_1=90$ нКл того же знака, что и на шарике. Определить длину нити l , при которой после отклонения шарик окажется на оси кольца, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр.

17.20. Горизонтально расположенное тонкое кольцо радиусом $R=20$ см равномерно заряжено зарядом линейной плотностью $\tau=+0,10$ мкКл/см. Из центра кольца вертикально вниз падает тело массой $m=5$ г, несущее заряд $Q_1=-10$ нКл. Определить ускорение a тела в тот момент, когда оно будет находиться на расстоянии $h=30$ см от плоскости кольца. Рассмотреть для случая положительного заряда Q_1 .

Напряженность и потенциал поля

17.21. В однородном электрическом поле, силовые линии которого горизонтальны, на тонкой невесомой нерастяжимой нити длиной $l=35$ см подвешен шарик массой $m=15$ г, несущий заряд $Q=3,0$ мкКл. Найти период собственных колебаний шарика, если напряженность электрического поля $E=40$ кВ/м.

17.22. Шарик массой $m=1,0$ г, несущий заряд $Q=1,0$ мкКл, подвешенный на нерастяжимой невесомой непроводящей нити, находится в однородном электрическом поле, силовые линии которого горизонтальны и направлены слева направо. Шарик отведен влево так, что нить отклонилась на угол $\alpha=45^\circ$ от вертикали, и отпущен. Найти напряженность поля E , если сила натяжения нити при прохождении шариком вертикального положения равна $F_n=80$ мН.

17.23. Шарик массой $m=2,0$ г, несущий заряд $Q=8,0$ мкКл, подвешенный на невесомой нерастяжимой непроводящей нити длиной $l=1,2$ м, совершает вращательное движение вокруг вертикальной оси так, что угол, составляемый нитью с вертикалью, $\alpha=20^\circ$. Найти период обращения T шарика, если силовые линии электрического поля напряженностью $E=1,4$ кВ/м вертикальны и направлены вверх.

17.24. Точечные заряды $Q_1=20$ нКл и $Q_2=-10$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $r=10$ см друг от друга. Определить напряженность поля E в точке, удаленной на расстояние $r_1=8$ см от первого и $r_2=7$ см от второго зарядов.

17.25. Электрический диполь с зарядами $Q_1=+90$ нКл и $Q_2=-90$ нКл и расстоянием между ними $l=10$ см находится в воздухе. Определить напряженность поля на оси диполя на расстоянии $l/4$ от одного из его зарядов; в центре диполя; на перпендикуляре к оси диполя, проходящем через один из его зарядов, на расстоянии $l/2$; на перпендикуляре к оси диполя, восставленном из середины его, на расстоянии $l/2$. Построить график $E=f(l)$ распределения поля между зарядами.

17.26. Два точечных положительных заряда $Q_1=Q_2=Q$ находятся в воздухе на расстоянии $l=5$ см друг от друга. Найти на оси симметрии этих зарядов точку, в которой напряженность электрического поля E максимальна.

17.27. Мыльный пузырь, висющий на конце тонкой трубки, при открытой трубке стягивается под действием сил поверхностного натяжения. Можно ли предохранить пузырь от полного

сжатия, сообщая ему большой электрический заряд? (При этом следует иметь в виду ограниченную диэлектрическую прочность воздуха, равную $E_0 = 3 \text{ МВ/м.}$) Если да, то какого диаметра d останется мыльный пузырь?

17.28. Два полых металлических шарика расположены концентрически. Заряд меньшего шарика 2 нКл, а большего 5 нКл. Найти напряженность поля внутри меньшего шарика; в точке, которая удалена на расстояние 7 см от общего центра и находится между шариками; в точке, находящейся вне шариков на расстоянии 15 см от общего центра.

17.29. Длинный тонкий прямой стержень, расположенный в вакууме, равномерно заряжен зарядом линейной плотностью $\tau = 1 \text{ нКл/м.}$ Определить напряженность электрического поля на расстоянии $r = 2,0 \text{ м}$ от стержня.

17.30. Два бесконечно длинных параллельных стержня, находящиеся на расстоянии $l = 2 \text{ м}$ в вакууме, заряжены равномерно зарядом линейной плотностью $\tau = 15 \text{ нКл/м.}$ Определить силу, действующую на единицу длины стержня.

17.31. Заряд $Q = 20 \text{ нКл}$ равномерно распределен на тонкой нити длиной $l = 1 \text{ м.}$ Определить напряженность поля E в точке, находящейся на расстоянии $r = 10 \text{ см}$ от нити и равноудаленной от ее концов.

17.32. Тонкое полукольцо радиусом R равномерно заряжено зарядом линейной плотностью τ и находится в вакууме. Определить напряженность поля E в центре кривизны.

17.33. Тонкое кольцо радиусом R равномерно заряжено зарядом линейной плотностью τ . Определить напряженность электрического поля в вакууме: 1) на расстоянии h от центра кольца на оси, перпендикулярной к его плоскости и проходящей через центр; 2) в центре кольца. На каком расстоянии от центра кольца на оси напряженность поля будет максимальной? минимальной?

17.34. Заряд $Q = 10 \text{ нКл}$ равномерно распределен по дуге окружности, радиус которой $R = 1 \text{ см}$, с углом раствора: 1) π рад;

2) $\frac{2\pi}{3}$ рад. Определить напряженность электрического поля в центре окружности.

17.35. Тонкий однородный диск радиусом R , расположенный горизонтально, заряжен равномерно зарядом поверхностной плотностью σ . Определить напряженность электрического поля в вакууме: 1) на расстоянии h от центра диска на оси, перпендикулярной к плоскости диска и проходящей через центр; 2) в центре диска. На каком расстоянии от центра диска на оси симметрии напряженность поля будет максимальной? минимальной?

17.36. Заряд $Q = 9 \text{ пКл}$ равномерно распределен на поверхности диска радиусом $R = 4 \text{ см}$, находящегося в вакууме. Найти напряженность поля E в точке, лежащей на перпендикуляре, про-

ходящем через центр диска, и отстоящей на расстоянии $l = 3 \text{ см}$ от него.

17.37. Определить потенциал поля в центре кольца с внешним радиусом $R_2 = 40,0 \text{ см}$ и внутренним $R_1 = 20,0 \text{ см}$, если на нем равномерно распределен заряд $Q = 0,6 \text{ мкКл.}$

17.38. Две бесконечно длинные параллельные нити заряжены разноименными зарядами и имеют одинаковую линейную плотность зарядов τ . Определить потенциал поля в точке, лежащей на расстояниях r_1 и r_2 от этих нитей.

17.39. Тонкое плоское кольцо, внутренний и внешний радиусы которого равны соответственно R_1 и R_2 , заряжено электрическим зарядом поверхностной плотностью σ . Определить потенциал поля в точке, лежащей на перпендикуляре, проведенном через центр кольца, и отстоящей на расстоянии r от центра этого кольца.

17.40. Шарик радиусом $R_0 = 0,2 \text{ см}$, имеющий заряд $Q = 18 \text{ пКл}$, находится в воздухе. Найти радиусы эквипотенциальных поверхностей, потенциалы которых отличаются друг от друга на $\Delta\varphi = 15 \text{ В.}$ Влиянием других заряженных тел пренебречь.

17.41. Шарик радиусом 1 см с равномерно распределенным по его поверхности зарядом Q находится в воздухе. Считая потенциал бесконечности равным нулю и пренебрегая влиянием других заряженных предметов, определить радиусы эквипотенциальных поверхностей, потенциалы которых отличаются друг от друга на 0,1 потенциала на поверхности шарика.

17.42. В однородном электрическом поле выбраны точки A, B, C, D и E , расположенные на равных расстояниях друг от друга. Найти потенциалы точек B и D , принимая поочередно A, C и E за точки нулевого потенциала, если разность потенциалов между точками B и D 50 В.

17.43. Эквипотенциальная линия проходит через точку поля напряженностью $E_1 = 5,0 \text{ кВ/м}$, отстоящую на расстоянии $l = 2,5 \text{ см}$ от заряда, создающего поле. На каком расстоянии от создающего поле заряда нужно провести другую эквипотенциальную линию, чтобы напряжение между линиями было $\Delta U = 25,0 \text{ В?}$

17.44. Найти потенциал φ капли ртути, получившейся в результате слияния n одинаковых шарообразных капель ртути, имеющих один и тот же потенциал φ_1 .

17.45. Заряд 0,5 нКл равномерно распределен на поверхности полого металлического шарика радиусом 2,5 см. Найти потенциал электрического поля в центре, на поверхности шарика и на расстоянии 5,0 см от центра. Построить график зависимости потенциала поля от расстояния до центра шарика.

17.46. Точечные заряды $Q_1 = -17 \text{ нКл}$ и $Q_2 = +20 \text{ нКл}$ находятся от точечного заряда $Q_3 = +30 \text{ нКл}$ соответственно на расстояниях $l_1 = 2 \text{ см}$ и $l_2 = 5 \text{ см}$. Какую минимальную работу против электрических сил надо совершить, чтобы поменять местами заряды Q_1 и Q_2 ?

17.47. Заряженный шарик массой $m=1$ г подвешен в воздухе на невесомой нерастяжимой непроводящей нити. Издалека к нему медленно приближают другой заряженный шарик и помещают его в ту точку, в которой первоначально находился первый шарик на нити, при этом он поднялся на высоту $h=1$ см. Определить работу, совершаемую внешними силами при перемещении другого шарика.

17.48. Шарик, имеющий заряд $Q=1$ мкКл, подвешен на невесомой изолирующей пружине жесткостью $k=9$ Н/м. Из бесконечности медленно приближают другой шарик с таким же зарядом и помещают его в ту точку, где первоначально находился шарик на пружине. Какую работу совершили при этом электростатические силы?

Проводники и диэлектрики в электрическом поле

17.49. Опыт Кавендиша заключается в измерении электрического поля внутри заряженной металлической сферы. Показать, пользуясь законом Кулона и принципом суперпозиции, что напряженность поля внутри заряженной металлической сферы равна нулю.

17.50. Одинаковые заряды Q находятся на расстояниях l_1 и l_2 от заземленной металлической сферы малого радиуса R (рис. 17.6). Расстояние до поверхности земли и других заземленных предметов много больше l_1 и l_2 . Найти силу, с которой заряды действуют на сферу.

17.51. Найти заряд Q_1 заземленного металлического шарика радиусом R , если на расстоянии r от его центра находится точечный заряд Q .

17.52. Маленький шарик, имеющий заряд $Q=20$ нКл, находится в вакууме на расстоянии $l=5$ см от центра до заземленной плоской металлической стенки. С какой силой они взаимодействуют?

17.53. На расстоянии r от центра шарика находится точечный заряд Q . Чему равен потенциал φ шарика?

17.54. Внутри полой проводящей сферы радиусом R , имеющей заряд $+Q_1$, через маленькое отверстие внесли тело, имеющее заряд $-Q_2$. Чему равен потенциал точки, находящейся на расстоянии $r>R$ от центра сферы?

17.55. В центре металлической сферы помещен точечный заряд Q_1 . Определить электрическое поле внутри и вне сферы в случае, если оболочка: не заряжена; заземлена.

17.56. В однородное электрическое поле напряженностью \vec{E} внесли металлический шарик. Известно, что плотность поверхностных зарядов на «полюсе» шарика в точке A (рис. 17.7) равна σ_0 . Определить плотность поверхностных зарядов в точке B , если радиус, проведенный из центра в эту точку шарика, составляет угол α с направлением вектора \vec{E} внешнего электрического поля.

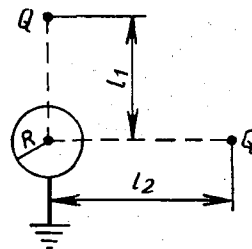


Рис. 17.6

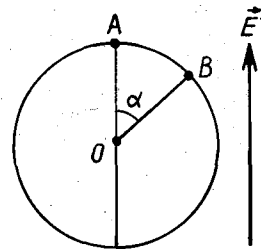


Рис. 17.7

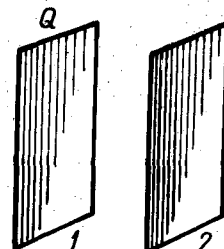


Рис. 17.8

17.57. Два металлических шарика радиусом $r=1$ см каждый находятся в вакууме. Расстояние между их центрами равно $l=2$ м. Определить разность потенциалов между шариками, если каждому шарiku сообщен противоположный по знаку заряд $Q=2$ нКл.

17.58. Две металлические пластины, находящиеся в вакууме на малом расстоянии, расположены параллельно (рис. 17.8). Пластина 1 сообщает заряд Q , пластина 2 не заряжена. Площади пластин одинаковы и равны S . Найти поверхностную плотность зарядов на обеих сторонах пластин.

17.59. В пространство между пластинами незаряженного плоского конденсатора вносят металлическую пластину, имеющую заряд Q , так, что между пластиной и обкладками конденсатора остаются зазоры l_1 и l_2 (рис. 17.9). Площади пластин одинаковы и равны S . Определить разность потенциалов между обкладками конденсатора.

17.60. В однородно заряженном шарике радиусом R имеется сферическая полость радиусом r , центр которой находится на расстоянии a от центра шарика (рис. 17.10). Найти напряженность электрического поля в различных точках полости, если плотность заряда на шарике равна ρ .

17.61. Полярную молекулу можно представить в виде жесткой гантели длиной $l=10,00$ нм с шариками на концах массой $m=10^{-24}$ г каждый, несущими заряды $+Q$ и $-Q$ ($|Q|=0,16$ аКл). Определить период колебаний полярной моле-

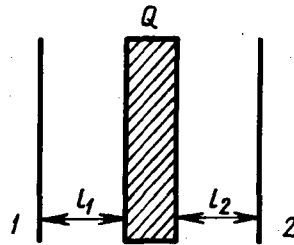


Рис. 17.9

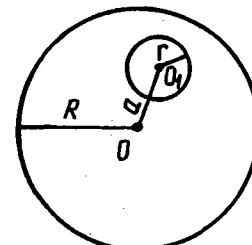


Рис. 17.10

кулы в однородном электрическом поле, напряженность которого $E = 0,30$ кВ/см.

17.62. Шарик радиусом $R = 5$ см, имеющий заряд $Q_1 = 210$ нКл, находится внутри диэлектрика диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 7$. Определить модуль и знак поляризованного заряда, возникающего в диэлектрике у поверхности заряженного шарика и экранирующего своим полем действие заряда шарика, а также плотность распределения поляризованного заряда.

17.63. Металлический шарик радиусом 2 см, имеющий заряд 12 нКл, окружен слоем диэлектрика толщиной 7 см диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Найти напряженность поля в точках, лежащих на расстояниях 5 и 11 см от центра шарика. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния до центра шарика.

17.64. Между пластинами плоского конденсатора, заряженного до напряжения $U = 400$ В, помещена диэлектрическая пластина толщиной $h = 1,2$ см и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5$. Найти: 1) поверхностную плотность σ свободных зарядов на обкладках конденсатора; 2) поверхностную плотность σ' связанных зарядов (зарядов поляризации) на пластине.

17.65. Заряд $Q = 0,4$ мкКл равномерно распределен по объему шарика радиусом $R = 3,0$ см. Найти напряженность, электростатическую индукцию и потенциал поля на расстояниях $r_1 = 2,0$ см и $r_2 = 4,0$ см от центра шарика. Построить график зависимости напряженности и потенциала поля от расстояния до центра шарика. Диэлектрическая проницаемость материала шарика $\epsilon = 5$.

17.66. Сферический слой, ограниченный радиусами $R_1 = 3$ см и $R_2 = 5$ см, равномерно заряжен зарядом плотностью $\rho = 3$ мкКл/м³. Диэлектрическая проницаемость слоя $\epsilon_1 = 5$, а окружающей среды $\epsilon_2 = 2,5$. Найти индукцию и напряженность электрического поля: 1) в центре слоя; 2) между поверхностями слоя на расстоянии $r = 4$ см от центра; 3) вне слоя на расстоянии $l = 4$ см от наружной поверхности. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния до центра сферического слоя. Чему равна разность потенциалов между поверхностями слоя?

Емкость

17.67. Одному шарiku сообщили заряд $Q_1 = 13$ нКл, другому — $Q_2 = 18$ нКл, затем шарики соединили проводником. Найти окончательное распределение зарядов на шариках, находящихся далеко друг от друга. Радиус первого шарика $R_1 = 8$ см, второго $R_2 = 18$ см. Емкостью соединительного проводника пренебречь.

17.68. Два заряженных шарика радиусами R_1 и R_2 , имеющие заряды Q_1 и Q_2 соответственно, находятся один от дру-

гого на расстоянии намного больше их радиусов. Найти заряды Q'_1 и Q'_2 и потенциал ϕ шариков после того, как их соединили проводником.

17.69. Металлический шарик радиусом $R_1 = 5$ см заряжен до $\phi = 150$ В. Чему равна напряженность поля в точке, находящейся на расстоянии $l = 10$ см от поверхности шарика? Как изменится напряженность поля, если шарик соединить со вторым незаряженным шариком, радиус которого $R_2 = 10$ см, а затем второй шарик удалить на большое расстояние?

17.70. Одной из пластин плоского конденсатора емкостью C сообщили заряд $+Q$, другой — $4Q$. Найти разность потенциалов между пластинами конденсатора.

17.71. Между пластинами плоского конденсатора (площадь каждой пластины 90 см²) находятся стеклянная пластина толщиной 1 мм и слюдяная пластина толщиной 2 мм. Определить емкость конденсатора.

17.72. Вычислить емкость цилиндрического конденсатора, если его длина 50 см, радиус внутреннего цилиндра 4 см, внешнего 9 см и полость между цилиндрами по всей длине конденсатора заполнена трансформаторным маслом.

17.73. Найти внутренний радиус цилиндрического бакелитового конденсатора ($\epsilon = 6$) емкостью 1,5 мкФ, если внешний радиус 10,0 см, длина конденсатора 20,0 см.

17.74. Два конденсатора емкостью C_1 и C_2 , рассчитанные на максимальное напряжение U_1 и U_2 соответственно, соединены последовательно. Какое напряжение можно подать на эту систему конденсаторов?

17.75. Конденсаторы емкостями $C_1 = 1$ мкФ и $C_2 = 2$ мкФ заряжены до разности потенциалов $\Delta\phi_1 = 10$ В и $\Delta\phi_2 = 50$ В соответственно. После зарядки конденсаторы соединили одинаковыми полюсами. Определить разность потенциалов $\Delta\phi$ между обкладками конденсаторов после их соединения.

17.76. Конденсатор емкостью $C_1 = 20$ мкФ заряжен до напряжения $U_1 = 200$ В. К нему присоединяют параллельно незаряженный конденсатор емкостью $C_2 = 300$ мкФ. Какое напряжение установится после их соединения?

17.77. Систему конденсаторов емкостью $C = 100$ мкФ, состоящую из трех параллельно соединенных одинаковых конденсаторов, включили в сеть напряжением $U = 250$ В. На обкладках одного из конденсаторов появился заряд $Q_1 = 10$ мКл. Определить емкость и заряд каждого из двух остальных одинаковых конденсаторов.

17.78. Максимальная емкость конденсатора переменной емкости $C_{\max} = 350$ пФ. Сколько пластин полукруглой формы радиусом $R = 5$ см содержит конденсатор, если расстояние между ними $d = 1$ мм?

17.79. Из конденсаторов емкостью 0,5 мкФ каждый, рассчитанных на рабочее напряжение 1,0 кВ, необходимо составить батарею конденсаторов емкостью 1,0 мкФ, которую можно было

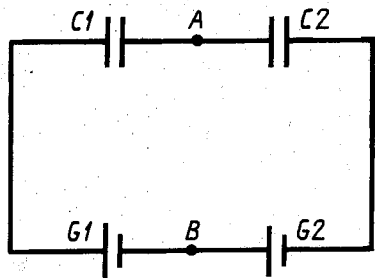


Рис. 17.11

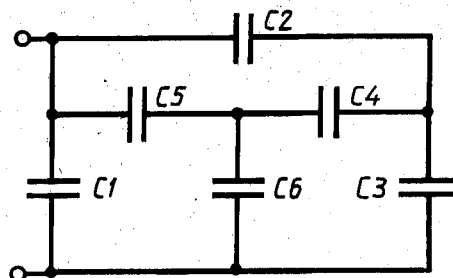


Рис. 17.12

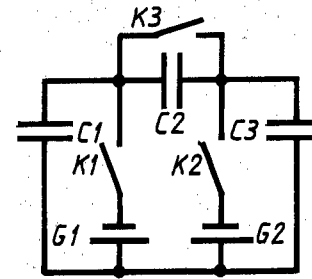


Рис. 17.13

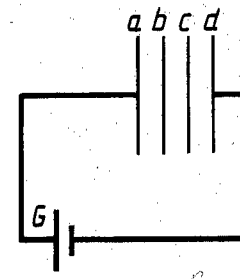


Рис. 17.14

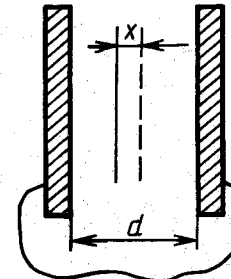


Рис. 17.15

бы присоединить к источнику тока напряжением 2,0 кВ. Сколько нужно для этого конденсаторов и как их соединить? Дать схему соединения.

17.80. Найти разность потенциалов между точками A и B схемы, изображенной на рисунке 17.11. Емкости конденсаторов $C_1 = 0,5$ мкФ и $C_2 = 1,0$ мкФ; ЭДС источников $\mathcal{E}_1 = 2$ В и $\mathcal{E}_2 = 3$ В.

17.81. Найти емкость батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 17.12, если емкость каждого конденсатора равна C.

17.82. В схеме, изображенной на рисунке 17.13, первоначально все ключи разомкнуты и все конденсаторы не заряжены. Затем замыкают ключи K1 и K2, а ключ K3 остается разомкнутым. Спустя некоторое время ключи K1 и K2 размыкают, а ключ K3 замыкают. Найти заряд на конденсаторе C1 после указанных переключений. Емкости конденсаторов и ЭДС источников указаны на рисунке буквами.

17.83. Чему равна емкость системы, если между обкладками плоского конденсатора вносится в одном случае пластина из диэлектрика, а в другом — пластина из проводника? Толщина каждой пластины равна половине расстояния d между обкладками.

17.84. Напряженность поля заряженного плоского конденсатора с расстоянием между пластинами 6,0 см равна 150 В/см. Параллельно пластинам в конденсатор вносится незаряженная металлическая пластина толщиной 1,5 см. Найти разность потенциалов между пластинами конденсатора до и после внесения металлической пластины.

17.85. В плоский конденсатор (рис. 17.14) помещают две металлические пластины на равных расстояниях и конденсатор подключают к источнику тока ЭДС \mathcal{E} . Найти: 1) потенциалы каждой из пластин; 2) приращение потенциалов пластин b и c и напряженности полей во всех промежутках, после того как пластины b и c на короткое время будут соединены проводником, а также определить, будут ли заряды на пластинах b и c до и после замыкания и что произойдет при этом с зарядами пластин a и d.

17.86. В плоский конденсатор с площадью пластин S и расстоянием между ними d вдвигается диэлектрическая пластина

толщиной h ($h < d$) диэлектрической проницаемостью ϵ_r . С помощью источника тока между пластинами конденсатора поддерживается постоянная разность потенциалов U. Найти емкость конденсатора в зависимости от толщины h вдвигаемой пластины и напряженность электрического поля в воздушном E_1 и диэлектрическом E_2 слоях, а также напряженность поля в обоих слоях, если конденсатор сначала отключается от источника тока и только после этого в конденсатор вдвигается указанная диэлектрическая пластина.

17.87. Между пластинами накоротко замкнутого плоского конденсатора поместили металлическую пластину с равномерно распределенным зарядом Q. Пластины медленно перемещают параллельно самой себе на расстояние x (рис. 17.15). Какой заряд проходит при этом по внешней цепи конденсатора, если расстояние между пластинами равно d?

17.88. Между пластинами накоротко замкнутого плоского конденсатора находится точечный заряд Q. Площадь пластин бесконечно велика, расстояние между ними равно d. Первоначально заряд находится на расстоянии d/3 от левой пластины. Какой заряд пройдет по проводнику, замыкающему пластины конденсатора, при перемещении заряда Q в новое положение на расстоянии d/3 от правой пластины?

17.89. Плоский конденсатор с расстоянием между пластинами $d = 1$ мм заряжен до напряжения $U = 1$ кВ. Найти силу взаимодействия между пластинами конденсатора площадью $S = 50$ см².

Энергия электрического поля

17.90. Два протона и два позитрона, первоначально покоившиеся в вершинах квадрата со стороной a (рис. 17.16), разлетаются. Отношение их масс $m_1/m_2 = 200$, а заряды одинаковы. Найти отношение скоростей протонов и позитронов после разлета (на бесконечность).

17.91. На рисунке 17.17 изображена капельная электростатическая машина (генератор Кельвина). Из трубки в полный

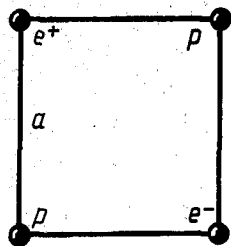


Рис. 17.16

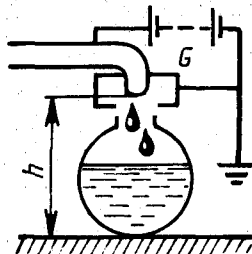


Рис. 17.17

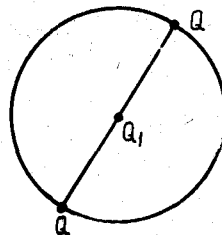


Рис. 17.18

изолированный металлический шар радиусом R падают капли воды, заряженные до потенциала φ_0 . Как зависит предельный потенциал, до которого может зарядиться шар, от высоты падения капель, если радиус капли r ?

17.92. На металлический изолированный шарик радиусом R направили пучок заряженных частиц, имеющих массы m и заряды Q . Скорости частиц, находящихся очень далеко от шарика, равны v_0 и направлены к его центру. Сколько частиц сможет достигнуть поверхности шарика, если при попадании на шарик частица «прилипает» к нему?

17.93. Два одинаковых точечных заряда Q , находящиеся на концах одного диаметра (рис. 17.18), движутся по окружности радиусом R вокруг заряда Q_1 . Найти угловую скорость движения зарядов Q и отношение общей кинетической энергии зарядов к потенциальной.

17.94. В однородное электрическое поле напряженностью E помещены вдоль одной и той же силовой линии неподвижный заряд $+Q_1$ и на расстоянии l от него заряженный шарик массой m и зарядом $+Q_2$ (рис. 17.19). Шарик отпускают. Какую максимальную скорость он получит, двигаясь вдоль силовой линии?

17.95. Пластины изолированного плоского конденсатора медленно раздвигают так, что емкость его меняется от C_1 до C_2 ($C_1 > C_2$), причем поле между пластинами все время остается однородным. Какую работу против электрических сил совершат внешние силы, если заряд конденсатора Q ?

17.96. Плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами $d=5$ см и площадью пластин $S=500$ см² подсоединен к источнику тока ЭДС $\mathcal{E}=2$ кВ. Параллельно пластинам в конденсатор вводится металлическая пластина толщиной $h=1$ см. Какую работу совершает источник тока?

17.97. Найти механическую работу, совершенную электрическими силами при повороте ручки настройки конденсатора переменной емкости, подключенного к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E}=300$ В, если емкость его изменяется от $C_1=10$ мкФ до $C_2=100$ мкФ.

17.98. Плоский воздушный конденсатор емкостью $C_1=1$ мкФ зарядили до разности потенциалов $U_1=300$ В и отключили

от источника напряжения. Какую работу против электрических сил необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами конденсатора в 5 раз? Какова будет после этого разность потенциалов U_2 между пластинами?

17.99. Плоский воздушный конденсатор находится во внешнем однородном электрическом поле напряженностью E и расположен перпендикулярно силовым линиям поля (рис. 17.20). Площадь каждой из пластин S , по пластинам равномерно распределены заряды $+Q$ и $-Q$, расстояние между пластинами d . Какую работу против электрических сил нужно совершить, чтобы повернуть конденсатор на 180° вокруг оси, перпендикулярной вектору \vec{E} ?

17.100. На сферической оболочке радиусом R равномерно распределен заряд Q . Используя закон сохранения энергии, найти электрическую силу, приходящуюся на единицу площади оболочки.

17.101. Две концентрические сферические поверхности, находящиеся в вакууме, имеют равномерно распределенные одинаковые заряды $Q=3$ мкКл. Радиусы этих поверхностей $R_1=1$ м и $R_2=2$ м. Найти энергию электрического поля, заключенного между этими сферами.

17.102. Как изменяются емкость C , разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ между пластинами и энергия поля конденсатора W при увеличении (уменьшении) расстояния d между пластинами конденсатора, если: 1) конденсатор зарядили и отключили от источника постоянного напряжения; 2) конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения? Объяснить причину изменения C , U и W .

17.103. Два конденсатора емкостью C_1 и C_2 заряжены до разностей потенциалов $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ ($\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_2$). Доказать, что при параллельном соединении этих конденсаторов их общая электростатическая энергия уменьшается. Объяснить, почему происходит уменьшение энергии.

17.104. Два конденсатора емкостью $C_1=2$ мкФ и $C_2=3$ мкФ соединили последовательно и зарядили до разности потенциалов $U=1$ кВ. Как изменится энергия системы, если ее отключить

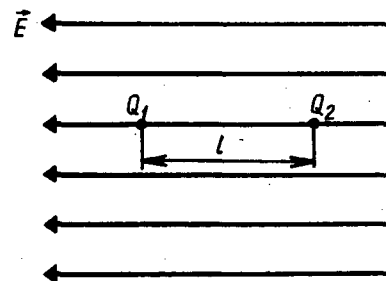


Рис. 17.19

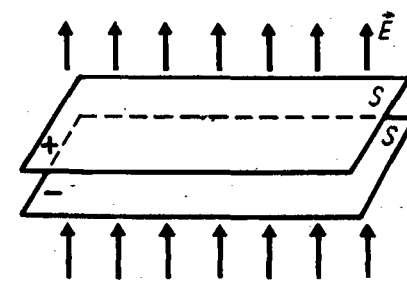


Рис. 17.20

от источника напряжения и одновременно заряженные обкладки конденсаторов соединить параллельно?

17.105. В пространство между пластинами плоского воздушного конденсатора введена капля масла, имеющая заряд $Q = 3,2$ аКл. Определить силу, действующую со стороны электрического поля на эту каплю, и энергию в единице объема этого поля, если расстояние между пластинами $d = 6,0$ мм и к ним приложена разность потенциалов $U = 360$ В, поддерживаемая источником ЭДС.

17.106. После зарядки до разности потенциалов $U = 1,5$ кВ плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами $d = 2,0$ см и площадью пластин $S = 0,20$ м² каждая отключают от источника тока и увеличивают расстояние между пластинами вдвое. Определить работу, совершаемую против сил поля по раздвижению пластин, и плотность энергии электрического поля конденсатора до и после раздвижения пластин.

17.107. Плоский конденсатор с площадью пластин 20 см² каждая и расстоянием между ними 3 мм заполнен диэлектриком диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Найти емкость конденсатора; заряд, который необходимо сообщить, чтобы зарядить конденсатор до напряжения 300 В; изменение напряжения конденсатора, если в заряженном состоянии (он отключен) из него вынуть диэлектрик; энергию поля конденсатора при наличии диэлектрика и без него.

§ 18. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

$$\text{Сила тока: } I = \frac{dQ}{dt}.$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{U_{1,2}}{R_{1,2}},$$

где $U_{1,2}$ — напряжение на данном участке цепи, $R_{1,2}$ — сумма всех сопротивлений участка.

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей:

1. Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узловых точках, равна нулю: $\sum_{k=1}^n I_k = 0$. Токи, притекающие к узловым

точкам, считаются положительными, вытекающие — отрицательными, или наоборот.

2. Для любого замкнутого контура, произвольно выбранного в сложной цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_k на сопротивление R_k соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i.$$

Для решения задач выбирается произвольное определенное направление обхода контура (например, по или против часовой стрелки). Во всех участках цепи произвольно выбираются направления токов. Токи, совпадающие с выбранным направлением обхода, считаются положительными, противоположные этому направлению — отрицательными. ЭДС источников тока считается положительной, если она увеличивает потенциал в направлении обхода контура.

Мощность, развиваемая током на рассматриваемом участке цепи:

$$P = U_{1,2} I.$$

Закон Джоуля — Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

Закон Ома

18.1. Сила тока в медном проводе сечением $S = 1$ мм², $I = 10$ мА. Найти среднюю скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов вдоль проводника, если считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости. Атомная масса меди $A = 63,6$, плотность $\rho = 8,9$ г/см³.

18.2. В течение 20 с сила тока равномерно возрастала от 0 до 5 А. Какой заряд был перенесен?

18.3. В проводнике площадью поперечного сечения $S = 5$ см² и числом свободных электронов $n_0 = 10^{23}$ см⁻³ сила тока $I = 10$ А. Определить направленную скорость электронов v , считая ее одинаковой для всех электронов.

18.4. Электрическая цепь (рис. 18.1) состоит из источника тока с внутренним сопротивлением $0,2$ Ом и внешнего сопротивления $12,0$ Ом. Найти силу тока во внешней цепи, ЭДС источника, если вольтметр показывает 120 В; сопротивление, которое необходимо подключить во внешнюю цепь, чтобы получить от этого источника силу тока 1 А, а также силу тока в цепи и показание вольтметра при коротком замыкании источника. Сопротивлением вольтметра пренебречь.

18.5. Батарея из двух параллельно соединенных источников с ЭДС $2,0$ и $1,8$ В и внутренним сопротивлением $50,0$ мОм каждый замкнута проводником сопротивлением $2,0$ Ом. Найти силу тока в проводнике и в каждом источнике. Рассмотреть для случая последовательного соединения.

18.6. Каково показание вольтметра (рис. 18.2), если $\mathcal{E}_1 = 1,8$ В, $\mathcal{E}_2 = 2,1$ В, $r_1 = 0,1$ Ом, $r_2 = 0,2$ Ом? Силой тока в вольтметре и сопротивлением соединенных проводов пренебречь.

18.7. Из медной проволоки длиной $l = 120$ м и площадью поперечного сечения $S = 24$ мм² намотана катушка. Найти приращение сопротивления катушки при нагревании ее от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 70^\circ\text{C}$.

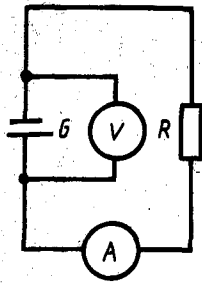


Рис. 18.1

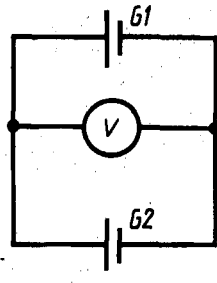


Рис. 18.2

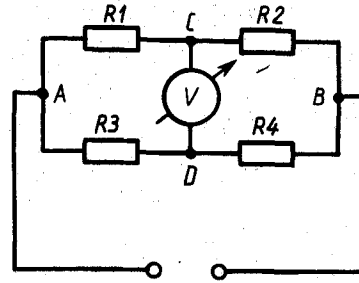


Рис. 18.3

18.8. Найти температуру нити вольфрамовой лампы накаливания в рабочем состоянии, если известно, что сопротивление нити в момент включения при температуре 20°C в 12,6 раза меньше, чем в рабочем состоянии.

18.9. К контуру, состоящему из резисторов R_1 и R_2 , R_3 и R_4 (рис. 18.3), в точках A и B подключен источник постоянного напряжения U , а в точках C и D — высокоомный вольтметр. Какую разность потенциалов покажет вольтметр?

18.10. На рисунке 18.4, a и b изображены две электрические цепи, состоящие из резисторов с известными сопротивлениями R и $2R$ и резистор неизвестного сопротивления r . При каком значении r сопротивления обеих цепей, измеренные между точками A и B , окажутся одинаковыми и каково при этом будет общее сопротивление цепей?

18.11. К батарее с ЭДС $\mathcal{E} = 9$ В и неизвестным внутренним сопротивлением подключены последовательно амперметр и вольтметр (рис. 18.5). Сопротивления приборов неизвестны. Если параллельно вольтметру включить проводник неизвестного сопротивления, то показание амперметра вдвое увеличится, а показание вольтметра вдвое уменьшится. Каким станет показание вольтметра после подключения проводника?

18.12. Найти общее сопротивление участка цепи между точ-

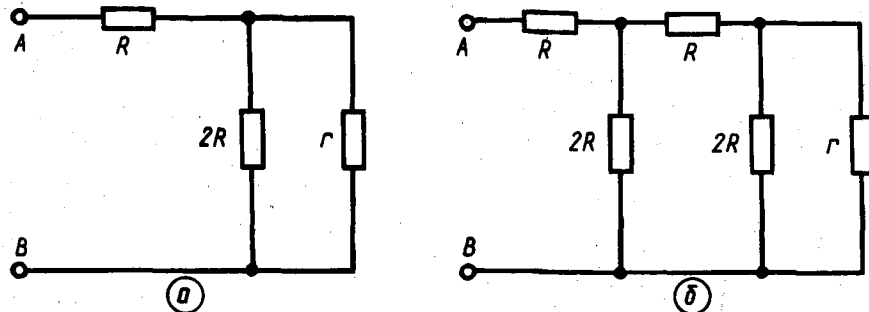


Рис. 18.4

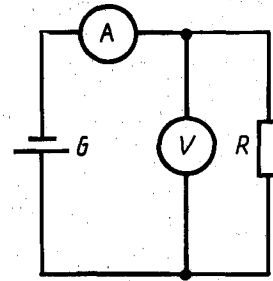


Рис. 18.5

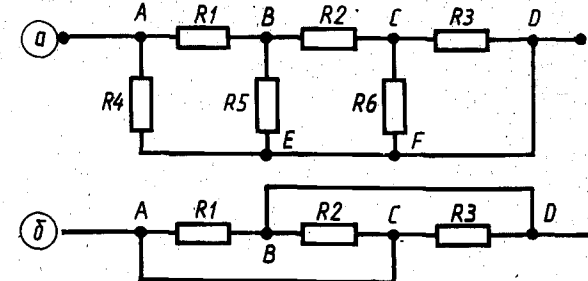


Рис. 18.6

ками A и D , изображенного на рисунке 18.6, если $R_1 = 0,5$ Ом, $R_2 = 1,5$ Ом, $R_3 = R_4 = R_6 = 1,0$ Ом, $R_5 = 0,7$ Ом. Сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

18.13. Найти общее сопротивление участка цепи между точками A и B , изображенного на рисунках 18.7, если сопротивление каждого проводника равно R .

18.14. Вычислить общее сопротивление участка цепи, изображенного на рисунках 18.8, если сопротивление $R = 1$ Ом.

18.15. Найти общее сопротивление $R_{\text{общ}}$ участка цепи, содержащего бесконечное число проводников (рис. 18.9) сопротивлением R каждый.

18.16. Что покажет амперметр в схеме (рис. 18.10), если $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 15$ Ом, $\mathcal{E} = 30$ В? Сопротивление амперметра очень мало.

18.17. Для питания прибора напряжение на его входе нужно устанавливать как можно точнее. Для этого используются два реостата, соединенные так, как показано на рисунке 18.11. Длины реостатов одинаковы, а сопротивление одного из них в 10 раз больше сопротивления другого. Как поступить, чтобы установить напряжение как можно точнее? Во сколько раз точность установки напряжения будет больше, чем в том случае, когда используется лишь один реостат? Как следует включить реостаты, если для питания прибора нужно устанавливать как можно точнее не напряжение, а силу тока?

18.18. При каком условии через проводник сопротивлением R , подключенный в точках A и B (рис. 18.12), не будет идти ток? Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

18.19. В цепи (рис. 18.13) $\mathcal{E} = 3,0$ В, $r = 0,8$ Ом, $R_1 = 0,6$ Ом, $R_2 = 2,0$ Ом, $R_3 = 8,0$ Ом. Найти силы тока в R_1 , R_2 , R_3 .

18.20. В цепи (рис. 18.14) течет постоянный ток. Ключ K размыкают. Через какое приблизительно время заряд на конденсаторе уменьшится на $1/1000$ своего первоначального значения?

18.21. Конденсатор емкостью $C = 10,0$ мкФ включен в цепь постоянного тока (рис. 18.15). Определить изменение заряда на конденсаторе после замыкания ключа K , если $R_1 = 2,0$ Ом, $R_2 = R_4 = 1,0$ Ом, $R_3 = 5,0$ Ом, $\mathcal{E} = 10,0$ В.

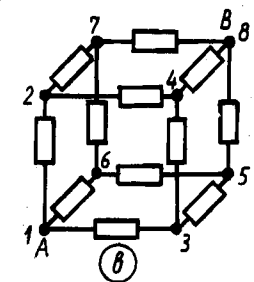
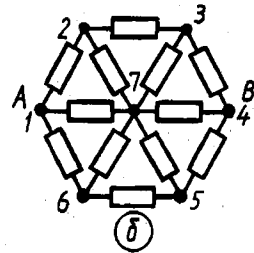
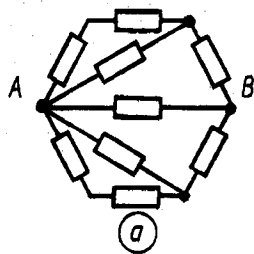


Рис. 18.7

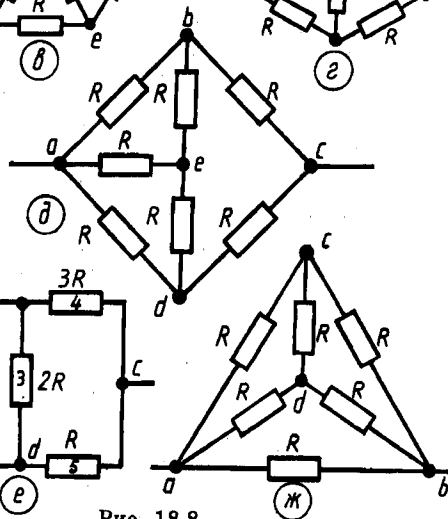
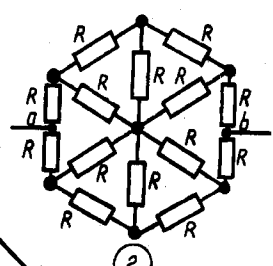
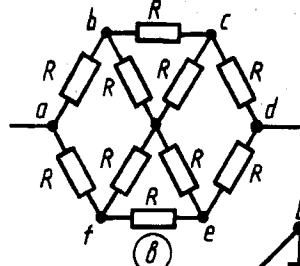
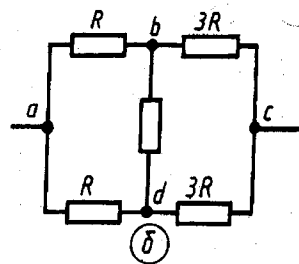
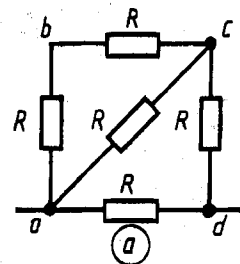


Рис. 18.8

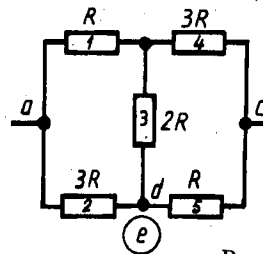


Рис. 18.9

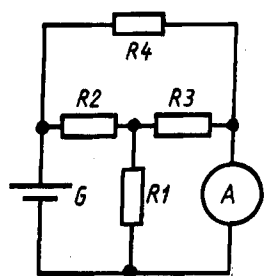
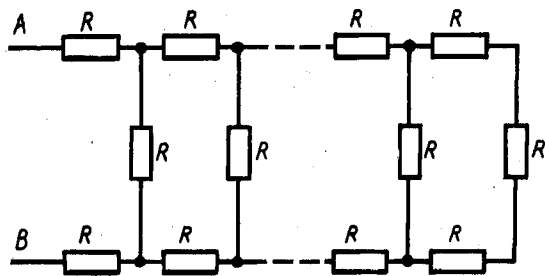


Рис. 18.10

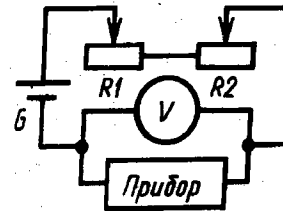


Рис. 18.11

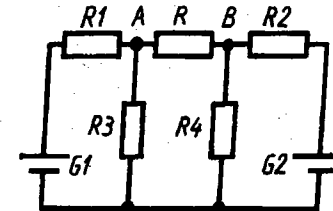


Рис. 18.12

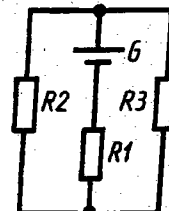


Рис. 18.13

ние $U = 20$ В, причем изменение сопротивления нагрузки R от 50 до 100 Ом должно вызывать изменение напряжения на ней не более чем на 2%. Составить простую схему для питания нагрузки и рассчитать параметры этой схемы.

18.24. Определить силу тока на участке AB (рис. 18.17). ЭДС источника $\mathcal{E} = 20$ В, внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом, потенциалы точек A и B $\varphi_A = 15$ В и $\varphi_B = 5$ В, сопротивление проводов $R = 3$ Ом.

18.25. Два одинаковых элемента соединены между собой так, как показано на рисунках 18.18, а и б. Определить напряжение между точками A и B .

18.26. Найти силу тока через перемычку ab (рис. 18.19), если считать, что сопротивление перемычки, подводящих проводов и внутреннее сопротивление батареи пренебрежимо малы.

18.27. К одному концу двухпроводной линии передачи электроэнергии присоединен источник постоянной ЭДС, а к другому — потребитель сопротивлением R_0 . В линии произошло повреждение изоляции, в результате чего сила тока в источнике возросла в 2 раза, а сила тока в нагрузке R_0 упала в 8 раз. Найти сопротивление изоляции в месте повреждения, если длина каждого провода линии равна l , а сопротивление единицы длины провода равно ρ .

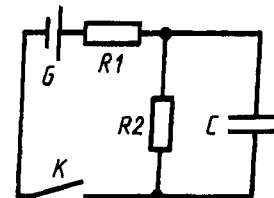


Рис. 18.14

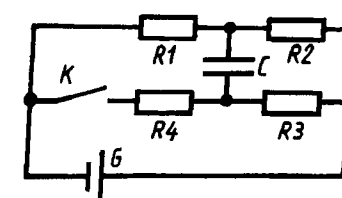


Рис. 18.15

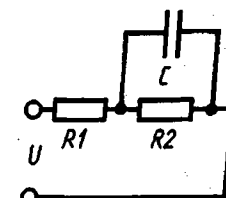


Рис. 18.16

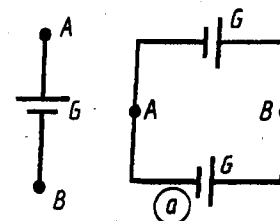


Рис. 18.17

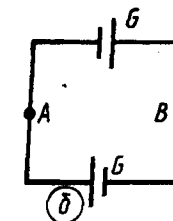


Рис. 18.18

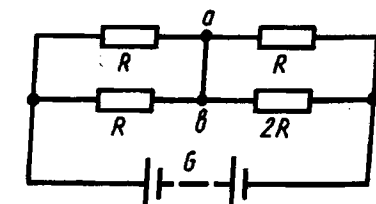


Рис. 18.19

Правила Кирхгофа

18.28. Как на мостике Уитстона измерить сопротивление гальванометра, который обычно включают в диагональ мостика, не пользуясь вторым гальванометром? Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

18.29. Найти силу тока в каждой ветви мостика Уитстона (рис. 18.20), если ЭДС источника тока $\mathcal{E} = 2$ В, $R_1 = 30$ Ом, $R_2 = 45$ Ом, $R_3 = 200$ Ом и гальванометр показывает силу тока, равную нулю. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

18.30. В плечи мостика Уитстона (рис. 18.21) включены резисторы с известными сопротивлениями R_2 , R_3 , R_4 и к нему приложено напряжение U . Найти сопротивление R_1 , если гальванометр сопротивлением r показывает силу тока I . Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

18.31. В плечи мостика Уитстона включены две лампы одинаковой мощности (рис. 18.22), рассчитанные на 110 В и 220 В соответственно. Найти отношение сопротивлений R_1/R_2 плеч при условии равновесия мостика, пренебрегая внутренним сопротивлением источника.

18.32. В цепи (рис. 18.23) найти силу тока в каждой ветви, если ЭДС источников тока равны $\mathcal{E}_1 = 1$ В, $\mathcal{E}_2 = 3$ В, $\mathcal{E}_3 = 5$ В, а сопротивления $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 2$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

18.33. Найти силу тока в цепи (рис. 18.24), если у каждого элемента ЭДС 2,2 В и внутреннее сопротивление 20,0 мОм, а $R_1 = R_2 = 2,0$ Ом, $R_3 = 6,0$ Ом, $R_4 = 4,0$ Ом и $R_5 = 0,9$ Ом.

18.34. Потенциометр сопротивлением R (рис. 18.25) находится под напряжением U . Найти напряжение U_1 на лампе сопротивлением R_1 в зависимости от включенной части x потенциометра. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

18.35. Найти силу тока в каждом из элементов (рис. 18.26), внутренние сопротивления которых одинаковы и равны 0,3 Ом, если $\mathcal{E}_1 = 1,3$ В, $\mathcal{E}_2 = 1,4$ В, $\mathcal{E}_3 = 1,5$ В, $R = 0,6$ Ом.

18.36. Найти силу тока гальванометра, включенного в цепь (рис. 18.27), пренебрегая внутренними сопротивлениями элемен-

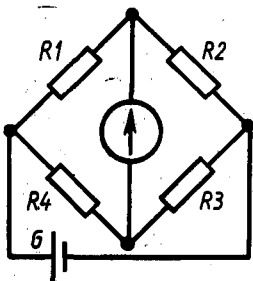


Рис. 18.20

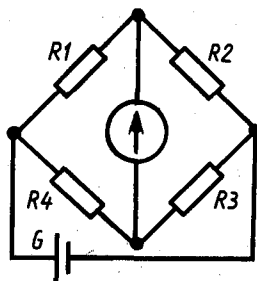


Рис. 18.21

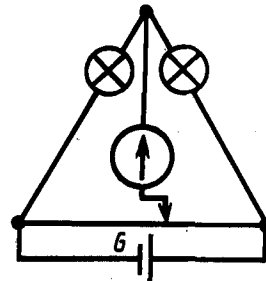


Рис. 18.22

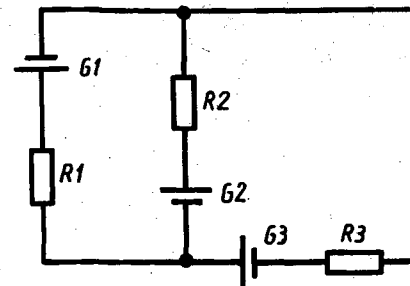


Рис. 18.23

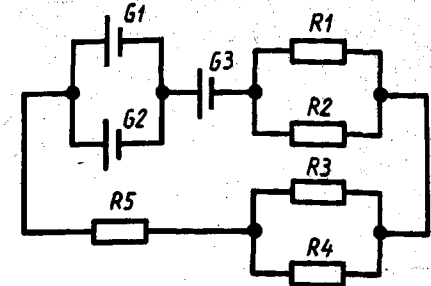


Рис. 18.24

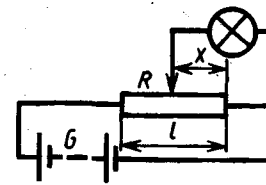


Рис. 18.25

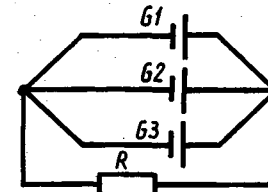


Рис. 18.26

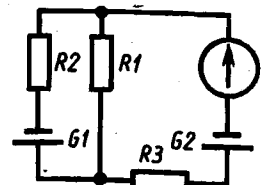


Рис. 18.27

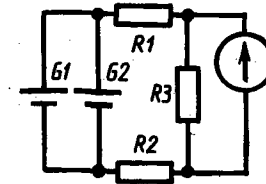


Рис. 18.28

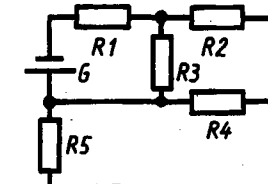


Рис. 18.29

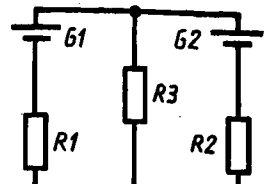


Рис. 18.30

тов, если $\mathcal{E}_1 = 2,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 1,0$ В, $R_1 = 1,0$ кОм, $R_2 = 500,0$ Ом, $R_3 = R_4 = 0,2$ кОм.

18.37. Найти силу тока гальванометра, включенного в цепь (рис. 18.28), если $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 1,5$ В, $r_1 = r_2 = 0,5$ Ом, $R_1 = R_2 = 2,0$ Ом, $R_3 = 1,0$ Ом, $R_4 = 3,0$ Ом.

18.38. В схеме (рис. 18.29) известны сила тока I_4 и сопротивления всех резисторов. Найти ЭДС батареи, пренебрегая ее внутренним сопротивлением.

18.39. Найти силы тока во всех участках цепи (рис. 18.30), если $\mathcal{E}_1 = 24$ В, $\mathcal{E}_2 = 18$ В, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = R_3 = 2$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

18.40. Три источника с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 10,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 5,0$ В, $\mathcal{E}_3 = 6,0$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,1$ Ом, $r_2 = 0,2$ Ом, $r_3 = 0,1$ Ом соединены, как показано на рисунке 18.31. Определить напряжение на резисторах сопротивлениями $R_1 = 5,0$ Ом, $R_2 = 1,0$ Ом, $R_3 = 3,0$ Ом.

18.41. Найти силы тока во всех участках цепи (рис. 18.32), если $\mathcal{E}_1 = 20,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 33,0$ В, $r_1 = 0,2$ Ом, $r_2 = 0,5$ Ом, $R_1 = 0,8$ Ом, $R_2 = 2,0$ Ом.

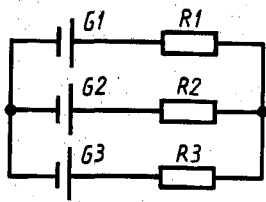


Рис. 18.31

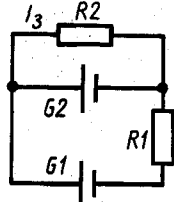


Рис. 18.32

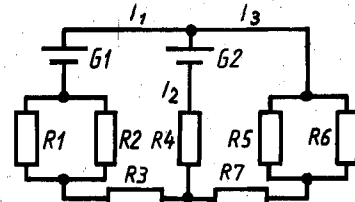


Рис. 18.33

18.42. Определить силы тока во всех участках цепи (рис. 18.33), если $\mathcal{E}_1 = 27,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 30,0$ В, $r_1 = 30,0$ мОм, $r_2 = 50,0$ мОм, $R_1 = R_2 = R_5 = 8,0$ Ом, $R_3 = 1,97$ Ом, $R_4 = 2,95$ Ом, $R_6 = 12,0$ Ом, $R_7 = 1,20$ Ом.

18.43. Найти силу тока в цепи (рис. 18.34), силы тока в отдельных ветвях цепи и эквивалентное сопротивление при разомкнутом и замкнутом ключе, если $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 3$ Ом, $R_4 = 6$ Ом, $\mathcal{E} = 18$ В. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

18.44. Два источника с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 30$ В, $\mathcal{E}_2 = 16$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 2$ Ом включены параллельно (рис. 18.35) и работают на общую нагрузку сопротивлением $R = 25$ Ом. Определить силы тока во всех ветвях и мощность, потребляемую нагрузкой.

18.45. Определить силы тока во всех участках цепи (рис. 18.36) и мощность, развиваемую каждым источником тока, если $\mathcal{E}_1 = 6,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 10,0$ В, $\mathcal{E}_3 = 20,0$ В, $r_1 = 0,2$ Ом, $r_2 = 0,2$ Ом, $r_3 = 0,4$ Ом, $R_1 = 19,8$ Ом, $R_2 = 45,8$ Ом, $R_3 = 100,0$ Ом, $R_4 = 99,6$ Ом.

18.46. Определить силы тока в отдельных ветвях цепи (рис. 18.37), если $\mathcal{E}_1 = 130,0$ В, $\mathcal{E}_2 = 117,0$ В, $R_1 = 1,0$ Ом, $R_2 = 0,6$ Ом, $R_3 = 24,0$ Ом.

18.47. Если потенциал анода фотоэлемента выше, чем потенциал катода, то сила тока фотоэлемента $I_0 = 10$ мА (ток насыщения); в противном случае сила тока фотоэлемента равна 0. Пренебрегая внутренним сопротивлением источников, найти напряжения на фотоэлементах в схемах, изображенных на рисунке 18.38, если $\mathcal{E}_1 = 0,1$ кВ, $\mathcal{E}_2 = 0,2$ кВ, $R_1 = 1,0$ кОм, $R_2 = 2,0$ кОм, $R_3 = 3,0$ кОм, $R_4 = 4,0$ кОм.

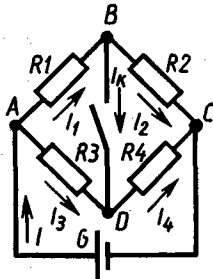


Рис. 18.34

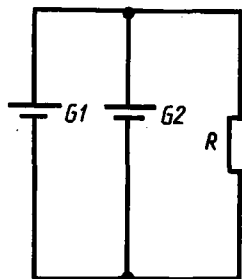


Рис. 18.35

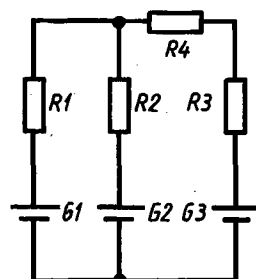


Рис. 18.36

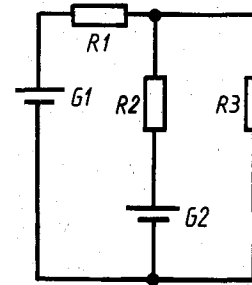


Рис. 18.37

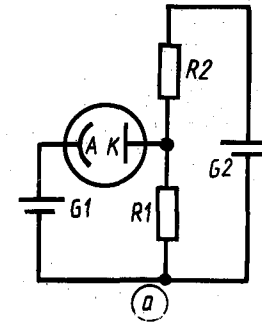
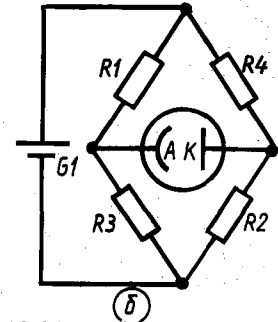


Рис. 18.38



Работа и мощность тока

18.48. Как из четырех тонких проволочных спиралей сопротивлениями 10, 20, 30 и 40 Ом, рассчитанных на мощности не более 2 Вт на каждой, составить нагреватель наибольшей возможной мощности, если имеется источник тока с ЭДС 20 В и внутренним сопротивлением 20 Ом?

18.49. Для того чтобы включить лампу в сеть напряжением, большим напряжения, на которое рассчитана лампа, можно воспользоваться схемой а или б (рис. 18.39). У какой из этих схем КПД выше, если в каждом случае лампа горит в нормальном режиме?

18.50. Лампа, включенная в сеть напряжением $U_1 = 200$ В, потребляет мощность $P_1 = 40$ Вт и ярко горит, причем температура нити $t_1 = 3000^\circ\text{C}$. При включении в сеть напряжением $U_2 = 100$ В лампа потребляет мощность $P_2 = 25$ Вт и еле светится, так как температура нити при этом равна $t_2 = 1000^\circ\text{C}$. Найти сопротивления R_0 нити лампы при температуре $t = 0^\circ\text{C}$.

18.51. Ток мощностью 10 кВт необходимо передать по медным проводам на расстояние 500 м при напряжении 200 В. Определить необходимое сечение проводов, напряжение в начале линии передач и мощность потерь в линии, если напряжение у потребителя ниже указанного на 5%, а потери напряжения в линии не должны превышать 10%.

18.52. Генератор постоянного тока развивает ЭДС 150 В и дает во внешнюю цепь силу тока 30 А. Определить мощность, развиваемую генератором; мощность потерь внутри источника; мощность потребителя; КПД источника, если его внутреннее сопротивление 0,6 Ом.

18.53. На горизонтально расположенный вал двигателя радиусом r равномерно наматывается нить с грузом массой m на конце. Двигатель подключен к источнику постоянного тока с ЭДС \mathcal{E} и силой тока в цепи I при полном сопротивлении цепи R . Чему равно число оборотов вала в секунду?

18.54. Холодильник мощностью P за время t превратил в лед

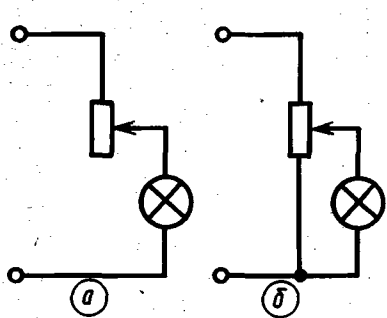


Рис. 18.39

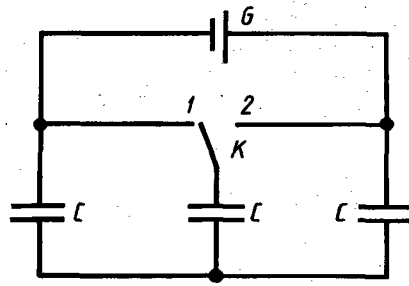


Рис. 18.40

л литров воды, которая первоначально имела температуру Θ . Какое количество теплоты выделилось в комнате за это время?

18.55. Температура электрического нагревателя, подключенного к источнику тока, равна t_1 . При охлаждении нагревателя с помощью вентилятора она понижается до значения t_2 . Будут ли количества теплоты, выделяемой нагревателем, в обоих случаях одинаковы?

18.56. Электрический нагреватель, включаемый в сеть напряжением $U = 220$ В, изготовлен из константанового провода, который должен нагреваться до $t_2 = 420^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Определить мощность нагревателя, длину l и диаметр d провода, если известно, что плотность тока в константановом проводе не должна превышать $J = 15,2$ МА/м². Коэффициент теплоотдачи принять равным $k = 64,7$ Вт/(м²·К).

18.57. Принимая охлаждение накаливаемой проволоки в воздухе прямо пропорциональным разности температур проволоки и воздуха и изменение сопротивления ее с понижением температуры незначительным, показать, что относительное удлинение проволоки, накаливаемой током, прямо пропорционально квадрату тока.

18.58. Имеются две проволоки квадратного сечения, изготовленные из одного и того же материала. Сторона сечения одной проволоки $a_1 = 1$ мм, а другой — $a_2 = 4$ мм. Для того чтобы расплавить первую проволоку, нужна сила тока $I_1 = 10$ А. Какой должна быть сила тока I_2 , чтобы расплавить вторую проволоку?

18.59. Какое количество теплоты выделится в цепи (рис. 18.40) при переключении ключа K из положения 1 в положение 2, если ЭДС источника \mathcal{E} , емкость каждого конденсатора C ?

18.60. Диод включен в цепь, изображенную на рисунке 18.41, а. Идеализированная вольт-амперная характеристика диода приведена на рисунке 18.41, б. Конденсатор предварительно не заряжен. Ключ K замыкают. Какое количество теплоты выделится на проводнике R при зарядке конденсатора? Емкость конденсатора C , ЭДС источника \mathcal{E} . Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

18.61. Решить предыдущую задачу для схемы, изображенной

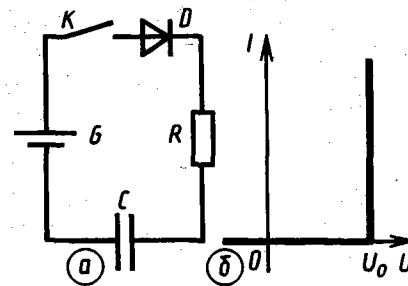


Рис. 18.41

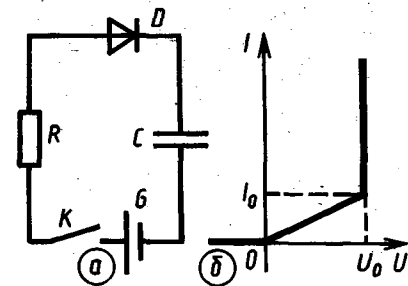


Рис. 18.42

на рисунке 18.42, а. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рисунке 18.42, б.

18.62. Какого сечения необходимо взять свинцовый предохранитель, если известно, что он плавится при повышении на $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ температуры проводки, выполненной из медного провода сечением $S = 5$ мм²? Начальная температура $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Отдачей теплоты в окружающую среду пренебречь.

18.63. В цепь, состоящую из медного провода площадью поперечного сечения $S_1 = 3$ мм², включен свинцовый предохранитель площадью поперечного сечения $S_2 = 1$ мм². На какое повышение температуры проводов при коротком замыкании цепи рассчитан этот предохранитель? Считать, что при коротком замыкании вследствие кратковременности процесса все выделившееся количество теплоты идет на нагревание цепи. Начальная температура предохранителя $t_0 = 17^\circ\text{C}$.

18.64. Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике закипает через $t_1 = 15$ мин, при включении другой — через $t_2 = 30$ мин. Через какое время t закипит вода в чайнике, если включить две обмотки: 1) последовательно; 2) параллельно?

18.65. Нагревательный элемент, изготовленный из нихромового провода диаметром $d = 0,15$ мм, рассчитан на напряжение $U = 220$ В и должен нагреваться до $t_2 = 450^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Найти силу тока в нагревателе, длину провода и мощность нагревателя, если коэффициент теплоотдачи $k = 75,6$ Вт/(м²·К).

18.66. Электрический чайник вместимостью $1,5$ дм³ имеет сопротивление нагревательного элемента 80 Ом, КПД 80% и работает при напряжении 220 В. Начальная температура воды 20°C . Определить мощность тока, потребляемую чайником; силу тока в нагревательном элементе; время, в течение которого вода в чайнике закипит, и стоимость энергии, если 1 кВт·ч стоит 4 коп.

18.67. ЭДС источника 24 В, сопротивление внешней цепи 10 Ом, падение напряжения внутри источника ЭДС 4 В. Определить напряжение на зажимах источника, силу тока в цепи, внутреннее сопротивление источника; мощность, потребляемую

внешней цепью; мощность потерь энергии внутри источника и полную мощность.

18.68. С каким КПД работает свинцовый аккумулятор, ЭДС которого $\mathcal{E} = 2,15$ В, если во внешней цепи сопротивлением $R = 0,25$ Ом сила тока $I = 5$ А? На какую максимальную полезную мощность рассчитан аккумулятор? Как изменится при этом его КПД?

18.69. По данным задачи 18.67 построить график изменения: 1) силы тока I в цепи; 2) полной мощности источника; 3) мощности тока, передаваемой во внешнюю цепь; 4) напряжения на зажимах источника; 5) КПД источника как функции переменного внешнего сопротивления, взяв следующие его значения (в Ом): 0; 1; 2; 4; 10; 22; 46.

18.70. Батарея с ЭДС 50 В и внутренним сопротивлением 5 Ом замыкается на внешнее переменное сопротивление, дающее возможность изменять силу тока в цепи от 0 до 10 А последовательно через 1 А. Построить графики зависимости от силы тока: 1) мощности тока, отдаваемой источником тока во внешнюю цепь; 2) мощности, рассеивающейся внутри источника; 3) полной мощности; 4) КПД источника.

18.71. Батарея с ЭДС 40 В и внутренним сопротивлением 5 Ом замыкается на внешнее сопротивление, изменяющееся от 0 до 35 Ом. Построить график зависимости от внешнего сопротивления: 1) мощности тока, отдаваемой во внешнюю цепь; 2) мощности потерь энергии внутри источника; 3) полной мощности; 4) КПД источника тока.

18.72. При каком значении сопротивления внешней цепи мощность, отдаваемая источником тока во внешнюю цепь, максимальна и каковы при этом сила тока и мощность?

§ 19. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ И КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Работа выхода электрона из металла:

$$A = e\varphi.$$

Зависимость плотности термоэлектронного тока от напряжения на аноде (насыщение не имеет места) выражается формулой Богуславского — Лэнгмюра:

$$J = KU^{3/2},$$

где K — постоянная, характеризующая размеры и форму электродов и не зависящая от температуры катода. Для плоских электродов

$$K = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{1}{d^2},$$

где d — расстояние между плоскими электродами.

Зависимость плотности тока насыщения от температуры выражается формулой Ричардсона — Дешмана:

$$J_H = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}},$$

где B — постоянная, равная $602 \text{ кА}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$, k — постоянная Больцмана, T — термодинамическая температура катода.

Контактная разность потенциалов:

$$\text{внешняя } \Delta\varphi_e = \frac{A_2 - A_1}{e},$$

$$\text{внутренняя } \Delta\varphi_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

где n_1 и n_2 — концентрация электронов проводимости в контактирующих металлах.

В ограниченном интервале температур термоЭДС \mathcal{E} зависит от разности температур спаев для цепи из двух различных металлов:

$$\mathcal{E} = \alpha (T_2 - T_1),$$

где α — коэффициент, зависящий от природы контактирующих металлов.

Термоэлектронная эмиссия

19.1. Электрон со скоростью 1,3 Мм/с ударяется о пластинку из цезия. Произойдет ли вырывание нового электрона из пластинки? Если да, то какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы произошло вырывание нового электрона с поверхности пластинки?

19.2. В электронной лампе ток насыщения достигает значения $I_H = 2,86$ мкА при температуре вольфрамового волоска катода $T = 2$ кК. Найти диаметр волоска катода, если длина его $l = 2$ см.

19.3. Во сколько раз изменится удельная термоэлектронная эмиссия вольфрама, находящегося при температуре 2400 К, если повысить температуру вольфрама на 100 К?

19.4. На аноде электронной лампы за 1 ч работы выделилось 63 Дж энергии при силе тока в лампе 6,3 мА. Найти скорость электронов катодного пучка, считая, что выделение теплоты происходит только за счет кинетической энергии электронов.

19.5. Напряженность поля между анодом и катодом телевизионной трубки, находящимися на расстоянии 10 см друг от друга, равна 100 кВ/м. Найти скорость и энергию электронов в момент удара их об экран трубки, если считать поле однородным.

19.6. Анодный ток электронной лампы 10 мА. Сколько электронов вылетает каждую секунду из катода лампы?

19.7. Найти крутизну характеристики трехэлектродной лампы и среднее внутреннее сопротивление ее на участке изменения анодного напряжения от 55 до 80 В, вызывающего изменение анодного тока от 40 до 70 мА, если коэффициент усиления равен 1.

19.8. Трехэлектродная лампа имеет внутреннее сопротивление

3 кОм и крутизну характеристики 3 мА/В. Найти коэффициент усиления этой лампы.

19.9. Внутреннее сопротивление трехэлектродной лампы с коэффициентом усиления 40 равно 8 кОм. Найти изменение анодного тока и крутизну характеристики, если изменение анодного напряжения составляет 120 В.

19.10. Определить концентрацию электронов в пучке электроннолучевой трубки осциллографа вблизи экрана. Сечение пучка $S = 1,0 \text{ мм}^2$, сила тока $I = 1,6 \text{ мкА}$. Электроны вылетают из катода без начальной скорости и ускоряются между катодом и анодом электрическим полем с разностью потенциалов $U = 28,5 \text{ кВ}$.

Контактные явления

19.11. Какой наибольший заряд может протечь по термопаре медь-платина при поглощении горячим спаем $Q = 4,19 \text{ Дж}$ энергии? Температура горячего спая $t_1 = 100^\circ\text{C}$, холодного $t_2 = 0^\circ\text{C}$, ЭДС $\mathcal{E} = 0,76 \text{ мВ}$.

19.12. Термопара висмут-железо с постоянной $\alpha = 92 \text{ мкВ/К}$ и сопротивлением $R = 5 \text{ Ом}$ присоединена к гальванометру внутренним сопротивлением $R_g = 110 \text{ Ом}$. Какую силу тока покажет гальванометр, если температура одного спая термопары $t_1 = 100^\circ\text{C}$, а другого $t_2 = 0^\circ\text{C}$?

19.13. Для измерения температуры среды в нее погружают один спай термопары никель-хром с постоянной $\alpha = 0,5 \text{ мВ/К}$, которая присоединена к гальванометру внутренним сопротивлением 2 кОм и ценой деления 10 нА/дел. Чему равна температура среды, если при температуре второго спая 15°C отклонение стрелки гальванометра составляет 25 делений?

19.14. Определить ЭДС термоэлемента при разности температур спаев 500 К, если термоэлектрическая постоянная его 50 мкВ/К.

19.15. Определить сопротивление гальванометра с ценой деления шкалы 15 нА/дел, если сопротивление термопары 6 Ом и ею можно измерять минимальное изменение температуры 6 мК. Термоэлектрическая постоянная термопары 50 мВ/К. Отклонение стрелки гальванометра 10 делений.

19.16. Работа выхода электронов из меди 4,47 эВ, а из свинца — 3,74 эВ. Какова внешняя контактная разность потенциалов в соединении этих двух металлов? Считать концентрации электронов проводимости одинаковыми.

19.17. Определить внутреннюю контактную разность потенциалов между медью и калием при температуре 27°C .

19.18. Термопара константан-железо сопротивлением 0,25 Ом подключена к гальванометру сопротивлением 5,0 Ом и ценой деления шкалы 0,95 мкА/дел, который при нагревании спая показывает силу тока 85,0 мкА. На сколько нагрелся спай и на сколько делений шкалы отклонилась стрелка, если постоянная термопары 51,60 мВ/К?

§ 20. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ И ГАЗАХ

Скорость установившегося направленного движения ионов:

$$v_{\pm} = b_{\pm} E,$$

где E — напряженность поля, b_{\pm} — подвижность ионов.

Закон Ома для электролитов:

$$J = n_0 Q \alpha (b_+ + b_-) E,$$

где α — коэффициент диссоциации, n_0 — число молекул растворенного вещества в электролите объемом 1 см^3 ; для газов при небольших плотностях тока:

$$J = Q n_0 (b_+ + b_-) E,$$

где n_0 — число пар ионов, находящихся в единице объема газа (насыщение не имеет места).

Плотность тока насыщения между плоскими электродами, отстоящими на расстоянии d друг от друга:

$$J = N e d.$$

Первый закон Фарадея:

$$m = k I t,$$

где k — электрохимический эквивалент, I — сила тока.

Второй закон Фарадея:

$$k = \frac{1}{F} x,$$

где $x = \frac{A}{Z}$ — химический эквивалент, A — атомная масса, Z — валентность; F — число Фарадея.

Электрический ток в электролитах

20.1. Определить массу меди, выделившейся на электродах из раствора сульфата меди (CuSO_4) в течение 2 ч при силе тока 10 А.

20.2. При разряде элемента разрядным током 0,2 А был израсходован цинк массой 5,0 мг. Найти время работы элемента.

20.3. При силе тока раствора 1 А на катоде выделилось 8,05 г вещества. Определить электрохимический эквивалент вещества, если ток через раствор протекал в течение 2 ч.

20.4. Какой заряд прошел через раствор сульфата серебра (Ag_2SO_4), если на катоде выделилось чистое серебро массой 16,77 г?

20.5. Ток плотностью 5 мА/см^2 протекает через электролитический раствор сульфата никеля (NiSO_4). За какое время отложится слой толщиной 50 мкм и какая мощность нужна для того, чтобы в течение 1 ч покрыть никелем поверхность пло-

щадью 1 мм^2 до указанной толщины, если напряжение 7 В ?

20.6. Для гальванического покрытия золотом пользуются раствором хлорида золота (AuCl_3). Через какое время можно получить слой золота толщиной 5 мкм , если плотность тока $0,2 \text{ А/дм}^2$?

20.7. Какой заряд нужно пропустить через электролитическую ванну, наполненную подкисленной водой, чтобы заполнить водородом шар-зонд диаметром $d=10 \text{ м}$ при нормальных условиях?

20.8. При электролизе воды через ванну в течение времени $t=25 \text{ мин}$ сила тока была $I=20 \text{ А}$. Какова температура выделившегося кислорода, если он находится в объеме $V=1 \text{ л}$ под давлением $p=0,2 \text{ МПа}$? Электрохимический эквивалент кислорода $8,29 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}$.

20.9. Зная атомные массы элементов, определить электрохимические эквиваленты серебра, меди, алюминия и никеля.

20.10. При силе тока $2,2 \text{ А}$ за $1 \text{ ч } 12 \text{ мин}$ в электролите, содержащем медь, на катоде выделилась медь массой $1,65 \text{ г}$. Определить КПД установки.

20.11. Три ванны с растворами CuSO_4 , AgNO_3 , NiSO_4 соединены последовательно. За время прохождения тока в первой ванне выделилась медь массой 10 г . Сколько никеля и серебра выдилось во второй и третьей ваннах соответственно?

20.12. В цепь электрической ванны с раствором сульфата меди включен амперметр, показывающий силу тока 5 А . На катоде за 25 мин выделилась медь массой $2,1 \text{ г}$. Правильно ли показывает амперметр?

20.13. Каково накопление заряда в аккумуляторе, содержащем пероксид свинца (PbO_2) массой 20 г ?

20.14. На основании законов электролиза определить массу водородного иона и заряд электрона.

20.15. Через стеклянную трубку сечением $83,4 \text{ мм}^2$, заполненную раствором поваренной соли (NaCl), проходит ток $2,7 \text{ А}$. Определить, сколько пар ионов образуется за 1 с в объеме 1 см^3 , если под влиянием электрического поля ионы хлора перемещаются в растворе со скоростью 1015 мкм/с , а ионы натрия — 675 мкм/с .

20.16. Определить концентрацию ионов натрия в водном растворе поваренной соли малой концентрации, если сила тока в плоских электродах, расположенных на расстоянии $d=10,0 \text{ см}$, равна $I=1,8 \text{ А}$. Напряжение между электродами $U_0=20,0 \text{ В}$, а подвижности ионов: $b_{\text{Na}^+}=0,45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$; $b_{\text{Cl}^-}=0,68 \times 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$. Площадь пластин $S=10^3 \text{ см}^2$.

20.17. Для покрытия слоем серебра поверхности площадью $S=500 \text{ см}^2$ понадобилось пропускать ток $I=2 \text{ А}$ в течение $t=5 \text{ ч}$ через раствор соли серебра. Найти толщину слоя серебра.

20.18. Элемент с ЭДС $\mathcal{E}=1,5 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r=0,5 \text{ Ом}$ замкнут на нагрузку сопротивлением $R=3,0 \text{ Ом}$.

Найти время работы элемента, в течение которого в нем израсходовано цинка массой $m=5,0 \text{ г}$.

20.19. Коэффициент диссоциации раствора нитрата серебра (AgNO_3) с концентрацией $n=30 \text{ кг/м}^3$ равен $\alpha=45\%$. Найти удельную электропроводность этого раствора при $t=18^\circ\text{C}$.

20.20. Сколько электроэнергии расходуется на получение алюминия массой 1 кг , если электролиз ведется при напряжении 10 В , а КПД всей установки 80% ? Атомная масса алюминия 27 .

20.21. Найти коэффициент диссоциации раствора хлорида серебра (AgCl), если удельное сопротивление его $\rho=0,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при концентрации $n=120 \text{ кг/м}^3$ и температуре $t=18^\circ\text{C}$.

20.22. Коэффициент диссоциации водного раствора хлорида калия (KCl) $77,5\%$. Найти концентрацию раствора, если удельное сопротивление его $74 \text{ мОм} \cdot \text{м}$.

Электрический ток в газах

20.23. Какой относительной скоростью должны обладать молекулы неона, чтобы при соударении произошла однократная ионизация одной из них?

20.24. Воздух, заключенный между пластинами плоского конденсатора, ионизируется внешним ионизатором. Найти скорость ионов в поле конденсатора емкостью 50 пФ и площадью пластин 250 см^2 каждая при напряжении 400 В между ними.

20.25. Найти концентрацию ионов между пластинами плоского конденсатора емкостью $6,6 \text{ пФ}$, если воздух ионизируется внешним ионизатором и при напряжении $450,0 \text{ В}$ сила тока $7,0 \text{ мкА}$. Насыщение не имеет места.

20.26. Аргон, находящийся между пластинами конденсатора площадью 300 см^2 каждая с расстоянием между ними 5 см , ионизируется внешним ионизатором. Найти число пар ионов, которые образуются за 1 с в аргоне объемом 1 см^3 , если сила тока насыщения между пластинами 4 пА .

20.27. Какой скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизовать атом аргона при ударе?

20.28. Между пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии $5,0 \text{ см}$ друг от друга, за 1 с в воздухе объемом 1 см^3 образуется $6,6 \cdot 10^6$ пар ионов под действием внешнего ионизатора. Найти площадь пластины конденсатора, если сила тока насыщения $3,0 \text{ пА}$.

20.29. Найти число пар ионов, образующихся в атмосфере в объеме 1 см^3 при нормальных условиях за 1 с между пластинами плоского конденсатора площадью 250 см^2 каждая, если при расстоянии между пластинами 5 см сила тока насыщения 1 фА .

20.30. Согласно опытным данным, искровой разряд в воздухе при нормальных условиях наступает при напряженности поля 30 кВ/см . Найти длину свободного пробега электрона, обладающего энергией 15 аДж при данных условиях.

20.31. При какой разности потенциалов между электродами

зажигается неоновая лампа, если энергия ионизации неона $A = 21,5$ эВ, а среднее расстояние между двумя последовательными столкновениями электрона с атомами газа равно $0,4$ нм? Электроды имеют вид больших пластин, расположенных на расстоянии $d = 3,0$ мм друг от друга.

20.32. Разность потенциалов между облаком и Землей в момент разряда (молнии) достигает 10 МВ, а протекший заряд 30 Кл. Найти энергию разряда и напряженность поля, если высота облаков 4 км.

20.33. Электрон проходит путь 10 см в поле напряженностью 10 МВ/м. Сколько атомов кислорода может ионизовать он на своем пути?

§ 21. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ И ТОКИ

Индукция магнитного поля, создаваемого элементом проводника длиной dl , по которому течет ток I (закон Био — Савара — Лапласа):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный от элемента проводника в точку, в которой определяется индукция $d\vec{B}$, r — модуль этого вектора, $d\vec{l}$ — вектор, численно равный длине dl элемента проводника и направленный в ту сторону, куда течет ток, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Модуль индукции \vec{B} магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным прямолинейным проводником на расстоянии R :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

В случае проводника конечной длины модуль индукции магнитного поля в точке A (рис. 21.1) вычисляется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\sin \beta_1 + \sin \beta_2).$$

Модуль индукции магнитного поля на оси кругового тока радиусом R на расстоянии d от плоскости контура:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}.$$

Модуль индукции магнитного поля на оси соленоида в точке P (рис. 21.2):

$$B = \frac{\mu_0}{2} n I (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),$$

где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

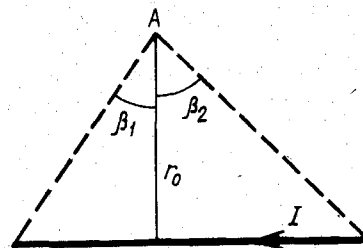


Рис. 21.1

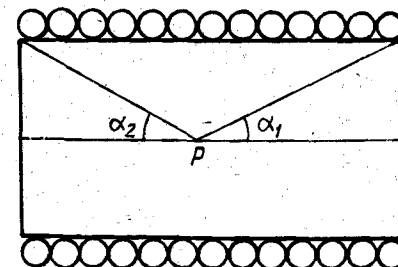


Рис. 21.2

Поле внутри длинного тонкого соленоида:

$$B = \mu_0 n I.$$

Циркуляция индукции магнитного поля вдоль замкнутого контура в вакууме равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром, умноженной на μ_0 :

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I_k.$$

Индукция магнитного поля, создаваемого движущимся зарядом Q :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q}{r^3} [\vec{v}, \vec{r}],$$

где \vec{v} — скорость заряда, \vec{r} — радиус-вектор, проведенный от заряда до точки, в которой определяется индукция \vec{B} .

В случае однородной изотропной среды магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где μ — магнитная проницаемость среды.

Магнитный момент замкнутого плоского контура, по которому течет ток I :

$$\vec{p}_m = I S \vec{n},$$

где S — площадь контура, \vec{n} — единичный вектор нормали к плоскости контура, направленный так, что при наблюдении с его конца ток в контуре кажется идущим против часовой стрелки.

Магнитный поток, пронизывающий элементарную площадку dS :

$$d\Phi = B \cos \alpha dS,$$

где α — угол между нормалью \vec{n} к площадке и вектором \vec{B} .

Магнитный поток в сердечнике тороида, имеющем воздушный зазор (формула Гопкинсона):

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu_0 \mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S}},$$

где N — число витков тороида, I — сила тока, l и l_0 — длины сердечника и зазора вдоль осевой линии, μ — магнитная проницаемость сердечника, S — площадь сечения сердечника.

На элемент $d\vec{l}$ проводника с током I , находящийся в магнитном поле индукцией \vec{B} , действует сила (закон Ампера):

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}].$$

На заряд Q , движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле индукцией \vec{B} , действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = Q[\vec{v}, \vec{B}].$$

При помещении пластины с силой тока I в однородное магнитное поле индукцией \vec{B} , которое направлено перпендикулярно к плоскости пластины, возникает поперечная разность потенциалов:

$$\Delta\varphi = R \frac{IB}{d},$$

где $R = \frac{1}{ne}$ — постоянная Холла, n — концентрация носителей заряда, e — элементарный заряд, d — толщина пластины.

Сила взаимодействия в вакууме двух длинных параллельных прямолинейных проводников с силами тока I_1 и I_2 , отнесенная к единице длины проводников:

$$f = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d},$$

где d — расстояние между проводниками.

Период колебаний магнитной стрелки (или контура с током), обладающей магнитным моментом \vec{p}_m и находящейся в магнитном поле индукцией \vec{B} , определяется формулой:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{p_m B}},$$

где I — момент инерции стрелки (или контура) относительно точки подвеса.

Сила, действующая на магнитный диполь:

$$\vec{F} = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n},$$

где $\frac{\partial \vec{B}}{\partial n}$ — производная вектора \vec{B} по направлению диполя.

Механический момент \vec{M} , действующий на контур с током (или на постоянный магнит) в однородном внешнем поле:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

21.1. По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга, текут токи противоположного направления $I = 30$ А. Определить магнит-

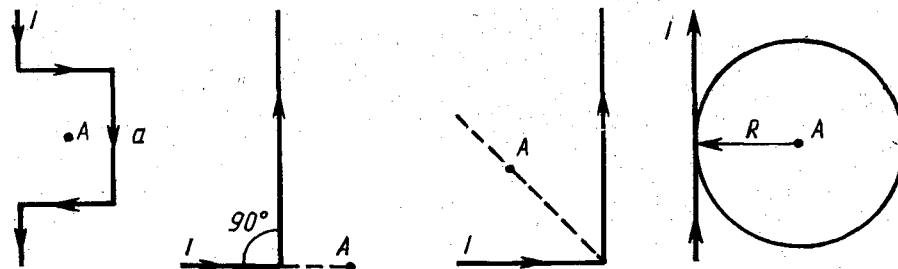


Рис. 21.3

Рис. 21.4

Рис. 21.5

Рис. 21.6

ную индукцию поля в точке, расположенной посередине между проводниками. Чему равна магнитная индукция поля в точке, которая находится на расстоянии $r_1 = 15$ см от одного и $r_2 = 5,0$ см от другого проводника?

21.2. Найти силу тока в бесконечно длинном проводнике, который имеет квадратный изгиб со стороной квадрата $a = 40$ см (рис. 21.3), если модуль магнитной индукции поля в точке A , расположенной в центре квадрата, $B = 63$ мкТл.

21.3. Определить магнитную индукцию поля в центре квадрата со стороной $a = 10$ см, по которому течет ток $I = 20$ А.

21.4. Определить магнитную индукцию поля в точке A (рис. 21.4), находящейся на продолжении одной из сторон прямого угла, образованного бесконечно длинным проводником, по которому течет ток $I = 15$ А, на расстоянии $a = 10$ см от вершины угла.

21.5. Ток $I = 10$ А течет по бесконечно длинному проводнику, согнутому под углом $\alpha = 90^\circ$. Найти магнитную индукцию поля в точке A , лежащей на биссектрисе угла на расстоянии $a = 0,20$ м от вершины (рис. 21.5).

21.6. Чему равна сила тока, проходящего по периметру правильного шестиугольника со стороной $a = 20$ см, если в его центре магнитная индукция $B = 10$ мкТл?

21.7. Два линейных проводника силами тока $I_1 = 3,0$ А и $I_2 = 4,0$ А расположены один горизонтально, а другой вертикально. Определить модуль магнитной индукции в точке, расположенной на середине кратчайшего расстояния между проводниками $d = 0,10$ м.

21.8. В двух бесконечно длинных параллельных проводниках силы тока равны $I = 2,5$ А. Токи имеют одинаковое направление. Вычислить магнитную индукцию поля в точке, которая расположена на расстоянии 40 см от одного проводника и 30 см от другого, если расстояние между ними 50 см.

21.9. Определить силу тока в катушке радиусом 30 см, содержащей 600 витков, если в центре катушки магнитная индукция равна 7,5 мТл. Считать, что длина катушки значительно меньше ее радиуса.

21.10. Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю радиусом $R = 80$ см (рис. 21.6). Определить силу тока в

проводнике, если известно, что в точке A магнитная индукция $B = 12,5$ мкТл.

21.11. Чему равна магнитная индукция поля на оси кругового витка в точке, расположенной на расстоянии $d = 40$ см от центра, если в центре витка, радиус которого $R = 30$ см, индукция $B_0 = 25$ мкТл?

21.12. Найти магнитную индукцию поля в центре соленоида длиной $l = 20$ см и диаметром $d = 4,0$ см, содержащего $N = 400$ витков, если сила тока в обмотке соленоида $I = 2,0$ А.

21.13. Определить силу тока в вертикально расположенной катушке, которая содержит $n = 8$ витков проволоки радиусом $R = 20$ см, если помещенная в ее центре на острие магнитная стрелка отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$. Плоскость витков катушки совпадает с плоскостью магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая магнитной индукции поля Земли $B_0 = 20$ мкТл.

21.14. Конденсатор емкостью $C = 8,0$ мкФ с помощью специального переключателя периодически заряжается от батареи, ЭДС которой $\mathcal{E} = 100$ В, и разряжается через катушку. Сколько раз за $t = 1,0$ с переключается конденсатор, если магнитная стрелка, помещенная в центре катушки, отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$? Обмотка катушки имеет $N = 50$ витков радиусом $R = 12,5$ см и расположена вертикально в плоскости магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая магнитной индукции поля Земли $B = 20$ мкТл.

21.15. Определить магнитную индукцию в центре шара радиусом R , равномерно покрытого очень большим числом N параллельных витков тонкой проволоки, по которым проходит ток I .

21.16. Сфера радиусом R , имеющая заряд с поверхностной плотностью σ , вращается вокруг ее диаметра с угловой скоростью ω . Найти магнитную индукцию, возникающую в центре сферы.

21.17. Определить магнитный момент кругового витка с током, если известно, что на его оси на расстоянии $d = 4,0$ см от центра индукция магнитного поля $B = 125$ мкТл. Радиус витка $R = 3,0$ см.

21.18. Соленоид длиной $l = 10$ см и диаметром $d = 4,0$ см содержит $n = 20$ витков на каждом сантиметре длины. Определить магнитный момент соленоида, если сила тока в нем $I = 2,0$ А.

21.19. В длинном прямолинейном однородном проводнике радиусом $R = 1,0$ см сила тока $I = 50$ А. Определить магнитную индукцию поля внутри проводника на расстоянии $r_1 = 0,80$ см от центра. Чему равна магнитная индукция поля вне проводника на расстоянии $r_2 = 5,0$ см от его центра?

21.20. В тонкой трубе радиусом $R = 5,0$ см сила тока 100 А. Определить магнитную индукцию поля в центре трубы и вне трубы на расстоянии $r = 5,0$ см от ее поверхности.

21.21. В тонкостенной длинной трубе сила тока $I = 5$ А. По оси трубы расположен тонкий проводник, по которому течет

такой же ток в обратном направлении. Найти индукцию магнитного поля в точках, расположенных внутри трубы на расстоянии $r_1 = 2$ см и вне трубы на расстоянии $r_2 = 12$ см от оси трубы.

21.22. Определить скорость равномерного прямолинейного движения электрона, если известно, что максимальное значение индукции создаваемого им магнитного поля на расстоянии $r = 100$ нм от траектории $B = 0,25$ мкТл.

21.23. Найти максимальное значение магнитной индукции поля, создаваемого прямолинейно движущимся электроном, который прошел ускоряющую разность потенциалов $U = 10$ В в точке, отстоящей от его траектории на расстоянии $r = 10$ нм.

21.24. Принимая орбиту электрона в невозбужденном атоме водорода за окружность радиусом $R = 53$ пм, определить магнитную индукцию поля, создаваемого в центре орбиты.

21.25. Тонкий эбонитовый диск радиусом $R = 20$ см равномерно заряжен электрическим зарядом с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ Кл/м². Диск вращается в воздухе вокруг перпендикулярной оси, проходящей через его центр, с угловой частотой $\omega = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Определить магнитную индукцию в центре диска.

21.26. В соленоиде, намотанном на стальной сердечник длиной 20 см и сечением $2,0$ см², сила тока $1,0$ А. Определить магнитный поток в сердечнике и его магнитную проницаемость, если соленоид содержит 400 витков. Соотношение между B и H для стали взять из графика $B = f(H)$.

21.27. На чугунном кольце сечением $4,0$ см² намотан провод в один слой так, что на каждый метр длины приходится 500 витков. Определить силу тока в обмотке, если магнитный поток, пронизывающий кольцо, $0,20$ мВб. Чему равна магнитная проницаемость чугуна при этой силе тока в обмотке? При решении задачи воспользоваться графиком $B = f(H)$.

21.28. Через обмотку тороида диаметром $d = 0,40$ м с железным сердечником проходит ток. Определить магнитную проницаемость железа, если при изменении воздушного зазора в тороиде от $h_1 = 1,0$ мм до $h_2 = 2,0$ мм поток магнитной индукции изменяется от $\Phi_1 = 0,30$ мВб до $\Phi_2 = 0,25$ мВб.

21.29. Чему равен поток индукции в железном тороиде квадратного сечения со стороной $a = 5$ см, содержащем однослойную обмотку из $N = 400$ витков, в которой сила тока $I = 2,0$ А? Диаметр тороида 25 см, магнитная проницаемость железа $\mu = 400$.

21.30. Сферический конденсатор, заполненный диэлектриком и заряженный до некоторой разности потенциалов, разряжается через свой диэлектрик. Каким будет магнитное поле токов разряда в пространстве между сферами?

21.31. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,10$ Тл находится прямой медный проводник сечением $S = 8,0$ мм², концы которого подключены гибким проводником, находящимся вне поля, к источнику постоянного тока. Определить силу тока в

проводнике, если известно, что при расположении его перпендикулярно к линиям индукции поля вес проводника уравновешивается силой, действующей на проводник со стороны поля. Вес гибких проводников не учитывать.

21.32. На каркас длиной $l=10$ см и диаметром $d=5,0$ см намотано 150 витков провода. Через середину каркаса в направлении одного из его диаметров проходит медный проводник с силой тока $I_1=5,0$ А. Считая магнитное поле внутри средней части соленоида однородным, определить силу, с которой оно действует на участок проводника внутри каркаса, если сила тока в соленоиде $I_2=1,0$ А.

21.33. В поле бесконечно длинного прямолинейного проводника, в котором сила тока $I_1=20$ А, находится квадратная рамка со стороной $a=10$ см, в которой сила тока $I_2=1,0$ А. Проводник и рамка расположены в одной плоскости так, что две стороны рамки перпендикулярны к проводнику. Расстояние от проводника до ближайшей стороны рамки $l=5,0$ см. Определить силу, действующую на рамку.

21.34. Чему равна мощность магнитной силы, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной $l=20$ см со скоростью $v=5,0$ м/с в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,10$ Тл, если угол между направлением движения проводника и направлением магнитных силовых линий $\alpha=90^\circ$, а сила тока в проводнике $I=50$ А?

21.35. На двух параллельных шинах, расположенных горизонтально на расстоянии $l=10$ см, лежит толстый проводник массой $m=100$ г. Шины подключены к источнику напряжения, и в проводнике возникает сила тока $I=10$ А. При создании магнитного поля, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости шин, проводник приходит в равномерное движение. Определить индукцию поля, если коэффициент трения проводника о шины $\mu=0,20$.

21.36. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U=500$ В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиусом $R=10$ см. Определить модуль магнитной индукции, если скорость электрона перпендикулярна силовым линиям.

21.37. Электрон, движущийся в вакууме со скоростью $v=10^6$ м/с, попадает в однородное магнитное поле с индукцией $B=1,2$ мТл под углом $\alpha=30^\circ$ к силовым линиям поля. Определить радиус винтовой линии, по которой будет двигаться электрон, и ее шаг.

21.38. Определить наименьшее значение радиуса дуантав циклотрона, предназначенного для ускорения протонов до энергии $E=0,80$ пДж, в котором индукция магнитного поля $B=0,5$ Тл. Зависимость массы протона от его скорости не учитывать.

21.39. Найти скорость α -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, не испытывает никакого отклонения.

Магнитная индукция поля $B=6,0$ мТл, напряженность электрического поля $E=6$ кВ/м. Направление скорости α -частицы перпендикулярно B и E .

21.40. Тонкая медная лента толщиной $d=0,10$ мм помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,90$ Тл так, что плоскость ленты перпендикулярна силовым линиям поля. В ленте сила тока $I=10$ А. Определить разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты, считая, что в меди имеется по одному свободному электрону на каждый атом.

21.41. Полагая, что в алюминии число свободных электронов, приходящихся на каждый атом, $Z=2$, определить разность потенциалов, которая возникает вдоль ширины ленты при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,60$ Тл. Ширина ленты $b=10$ см, плотность тока в ленте $j=5,0$ МА/м². Вектор индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости ленты.

21.42. В однородном магнитном поле с индукцией $B=0,80$ Тл помещена тонкая медная пластина, в которой сила тока $I=5,0$ А. Вектор индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости пластины. Толщина пластины $d=0,01$ мм. Определить концентрацию свободных электронов в меди, если возникшая вдоль ширины ленты разность потенциалов $\Delta\varphi=2,0$ мкВ.

21.43. Вблизи соленоида, создающего магнитное поле с индукцией $B=0,2$ мТл, направление которого совпадает с направлением горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, подвешена на вертикальном острие магнитная стрелка массой $m=6,0$ г и длиной $l=10$ см, магнитный момент которой $p_m=2,0$ А·м². Определить значение горизонтальной составляющей индукции земного магнитного поля, если стрелка совершает колебания с периодом $T=0,67$ с.

21.44. Магнитная стрелка компаса совершает колебания в магнитном поле Земли. Масса стрелки $m=3,0$ г, длина $l=6,0$ см и магнитный момент $p_m=3,14$ А·м². Найти период колебаний стрелки, если горизонтальная составляющая магнитной индукции поля Земли $B_0=20$ мкТл.

21.45. Магнитная стрелка длиной $l=10$ см и массой $m=6,0$ г, подвешенная на острие, совершает колебания в магнитном поле Земли. Определить значение горизонтальной составляющей магнитной индукции поля Земли, если магнитный момент стрелки $p_m=40$ А·м², а период колебаний $T=0,50$ с.

21.46. Соленоид и постоянный магнит, оси которых расположены вдоль одной прямой, находятся на расстоянии $d=1,0$ м, значительно превышающем их размеры. Определить силу взаимодействия соленоида и магнита, если их магнитные моменты соответственно $(p_m)_1=1,5$ А·м² и $(p_m)_2=1,0$ А·м².

21.47. В двух параллельных проводниках двухпроводной линии длиной $l=5,0$ м силы тока равны $I=500$ А. Направление токов противоположное. С какой силой взаимодействуют провода, если расстояние между ними $d=25$ см?

21.48. Батарея аккумуляторов с ЭДС $\mathcal{E} = 120$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,50$ Ом соединена с потребителем двумя медными параллельными проводами, расположенными на расстоянии $d = 5,0$ см один от другого. Провода укреплены на изоляторах, расстояние между которыми $l_1 = 50$ см. Определить силу, действующую на изоляторы при коротком замыкании на зажимах потребителя, если длина проводников $l_2 = 20$ м, а сечение проводов $S = 3,0$ мм².

21.49. Тонкий магнит длиной 12 см, магнитный момент которого $6,0$ А·м², помещен в однородное магнитное поле с индукцией $0,2$ Тл. Ось магнита образует с вектором индукции магнитного поля угол 90° . Определить момент сил, действующих на магнит.

21.50. Какой вращающий момент испытывает рамка с силой тока $I = 10$ А при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,50$ Тл, если рамка содержит $N = 50$ витков площадью $S = 20$ см², а ее нормаль образует с вектором индукции магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$?

21.51. Рамка гальванометра, содержащая $N = 500$ витков площадью $S = 2,0$ см², подвешена на тонкой нити длиной $l = 10$ см в зазоре между полюсами магнита, который создает магнитное поле с индукцией $B = 0,20$ Тл, направленное радиально к оси вращения рамки. Какова цена деления шкалы, если она расположена на расстоянии $L = 1,0$ м от зеркала, а деления нанесены через $d = 1,0$ мм? Радиус нити $r = 50$ мкм, модуль сдвига материала нити $G = 45$ ГПа.

21.52. При ударе молнии трубка диаметром $d = 1,5$ см и толщиной стенок $h = 1,0$ мм, соединяющая молниеотвод с землей, мгновенно превратилась в круглый стержень. Произвести оценку силы тока разряда, если известно, что предельное напряжение, при котором разрушается материал трубки при сжатии, $\sigma_{пр} = 20$ ГПа.

§ 22. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Закон электромагнитной индукции Фарадея:

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

При движении проводника длиной l в магнитном поле с индукцией B

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

где v — скорость движения проводника, α — угол между направлениями скорости и вектора индукции магнитного поля.

Заряд, индуцируемый в замкнутом контуре сопротивлением R при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, от Φ_1 до Φ_2 :

$$Q = \frac{1}{R}(\Phi_1 - \Phi_2).$$

Индуктивность соленоида:

$$L = \mu \mu_0 n^2 V,$$

где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, V — его объем.

ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

Магнитный поток, создаваемый током, в катушке индуктивностью L :

$$\Phi = LI.$$

Взаимная индуктивность двух соленоидов, имеющих общий сердечник:

$$L_{12} = \mu \mu_0 n_1 n_2 V.$$

Мгновенное значение силы тока в цепи, содержащей ЭДС \mathcal{E} , сопротивление R и индуктивность L , через время t после замыкания:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}).$$

При размыкании цепи

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t},$$

где I_0 — сила тока в цепи при $t = 0$, t — время с момента размыкания цепи.

Плотность энергии магнитного поля:

$$w = \frac{BH}{2}.$$

Магнитная энергия катушки с током:

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

22.1. Определить работу, совершаемую против магнитных сил при перемещении проводника длиной $l = 0,20$ м, по которому течет ток $I = 5,0$ А, перпендикулярно линиям магнитной индукции $B = 100$ мТл, если перемещение проводника $s = 0,50$ м.

22.2. Виток радиусом 10 см, по которому течет постоянный ток $I = 20$ А, помещен в магнитном поле с индукцией 1 Тл так, что его нормаль образует с вектором магнитной индукции угол 60° . Определить работу, которую нужно совершить против магнитных сил, чтобы удалить виток из поля.

22.3. Определить разность потенциалов, возникающую на концах вертикальной автомобильной антенны длиной $l = 1,2$ м при

движении автомобиля с востока на запад в магнитном поле Земли со скоростью $v = 20$ м/с. Горизонтальная составляющая земного магнитного поля $B_0 = 20$ мкТл.

22.4. Алюминиевый диск радиусом $R = 40$ см вращается вокруг вертикальной оси с частотой $n = 40$ об/с. Какова разность потенциалов между центром и краем диска, если вертикальная составляющая земного магнитного поля $B = 50$ мкТл?

22.5. Железнодорожные рельсы изолированы друг от друга и от земли и соединены через милливольтметр. Каково показание прибора, если по рельсам проходит поезд со скоростью 20 м/с? Вертикальную составляющую индукции магнитного поля Земли принять равной $B = 50$ мкТл, а расстояние между рельсами 1,54 м. Самоиндукцией пренебречь.

22.6. Чему равна индукция однородного магнитного поля, если при вращении в нем прямолинейного проводника длиной $l = 0,2$ м вокруг одного из его концов с угловой скоростью $\omega = 50$ рад/с на концах проводника возникает разность потенциалов $U = 0,2$ В?

22.7. Рамка, содержащая $n = 10$ витков площадью $S = 5,0$ см², присоединена к баллистическому гальванометру с внутренним сопротивлением $R_1 = 58$ Ом и помещена между полюсами электромагнита так, что линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости рамки. Определить индукцию поля, создаваемого электромагнитом, если при повороте рамки на 180° в цепи гальванометра протекает заряд $Q = 30$ мкКл. Сопротивление рамки $R_2 = 2,0$ Ом.

22.8. К баллистическому гальванометру с внутренним сопротивлением $r_{вн} = 31$ Ом присоединено кольцо радиусом $R = 1,0$ м, изготовленное из алюминиевой проволоки сечением $S = 1,0$ мм². На какое расстояние отклонится зайчик на шкале, если кольцо, лежащее на горизонтальной поверхности стола, повернуть с одной стороны на другую? Вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли $B_0 = 50$ мкТл. Зайчик отклоняется на 1 мм при прохождении через рамку гальванометра заряда 10^{-8} Кл (баллистическая постоянная гальванометра $C_0 = 10^{-8}$ Кл/мм).

22.9. Определить индуктивность катушки, если при изменении в ней силы тока от 0 до 5 А за время 2 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В.

22.10. В длинной катушке радиусом $R = 2,0$ см, содержащей $N = 500$ витков, сила тока $I = 5,0$ А. Определить индуктивность катушки, если индукция магнитного поля внутри катушки $B = 12,5$ мТл.

22.11. На длинный стальной сердечник сечением $S = 4,0$ см² намотан соленоид, содержащий 1000 витков, по которым проходит ток $I = 0,50$ А. Определить индуктивность соленоида при этих условиях, если напряженность магнитного поля внутри соленоида $H = 2,0$ кА/м. Воспользоваться графиком $B = f(H)$.

22.12. Найти индуктивность соленоида, полученного при на-

мотке провода длиной $l_1 = 10$ м на цилиндрический железный стержень длиной $l_2 = 10$ см. Магнитная проницаемость железа $\mu = 400$.

22.13. На железный сердечник сечением $S_1 = 5$ см² и длиной $l = 30$ см намотан соленоид, содержащий 500 витков медной проволоки сечением $S_2 = 1$ мм². Чему равна индуктивность соленоида при подключении его к аккумулятору с ЭДС 1,26 В? Внутренним сопротивлением аккумулятора и сопротивлением подводящих проводников пренебречь. Воспользоваться графиком $B = f(H)$.

22.14. На общий каркас намотаны две катушки. Определить коэффициент взаимной индукции катушек, если постоянный ток 5,0 А в первой катушке создает во второй магнитный поток сцепления 40 мВб.

22.15. При изменении силы тока в катушке со скоростью 100 А/с в другой катушке индуцировалась ЭДС 0,2 В. Найти коэффициент взаимной индукции.

22.16. Определить коэффициент взаимной индукции между кольцевой катушкой с неферромагнитным сердечником, содержащей N витков, и длинным прямолинейным проводом, расположенным вдоль оси катушки. Высота катушки h , внутренний и наружный радиусы соответственно равны R_1 и R_2 .

22.17. Замкнутая накоротко катушка диаметром 10 см, имеющая 200 витков, находится в магнитном поле, индукция которого увеличивается от 2 до 6 Тл в течение 0,1 с. Определить среднее значение ЭДС индукции в катушке, если плоскость витков перпендикулярна линиям магнитной индукции.

22.18. Определить зависимость от времени ЭДС индукции, возникающей в рамке площадью 20 см², помещенной в магнитное поле, если магнитная индукция изменяется по закону $B = 0,03(1 + e^{-2t})$. Площадь рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции.

22.19. Диаметр каркаса соленоида $d = 0,10$ м. Соленоид содержит $N = 500$ витков. При подключении соленоида к аккумулятору с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В через $t = 1,0 \cdot 10^{-3}$ с сила тока в цепи достигает значения $I = 2,0$ А. Определить длину соленоида, если его сопротивление $R = 3,0$ Ом, а сопротивлениями аккумулятора и подводящих проводников можно пренебречь.

22.20. Определить энергию магнитного поля соленоида, содержащего $N = 500$ витков, которые намотаны на картонный каркас радиусом $R = 2,0$ см и длиной $l = 0,50$ м, если сила тока в нем $I = 5,0$ А.

22.21. Радиус длинного парамагнитного сердечника соленоида $R = 1,0$ см. Соленоид содержит $n = 10$ витков на 1 см длины. Обмотка выполнена из медного провода сечением $S = 1,0$ мм². Через какое время в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике, если она подключена к источнику постоянного напряжения?

22.22. В обмотке соленоида, сопротивление которой $R = 1,0$ Ом

и индуктивность $L=20$ мГн, сила тока $I=5,0$ А. Чему равна энергия магнитного поля соленоида через $t=1,0$ мс после отключения источника?

22.23. На железном кольце, средний диаметр которого $d=20$ см, имеется обмотка с числом витков $N=800$. В кольце сделана прорезь шириной $b=1,0$ мм. При силе тока в обмотке $I=1,0$ А магнитная индукция в зазоре $B=0,8$ Тл. Определить магнитную проницаемость железа при этих условиях. Рассеянием поля у краев зазора пренебречь.

22.24. Торойд с сердечником из чистого железа имеет обмотку, содержащую $N=500$ витков, в которой сила тока $I=2$ А. Сечение тороида $S=10$ см², средний радиус $R=30$ см. Определить магнитную энергию, запасенную в сердечнике. Воспользоваться графиком $B=f(H)$.

22.25. Виток изолированного провода изогнут в виде восьмерки, кольца которой имеют радиусы $r_1=6,0$ см и $r_2=3,0$ см. Виток находится в магнитном поле с индукцией $B=1,0$ Тл. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости витка. Изоляция провода рассчитана на напряжение 10 В. Произойдет ли пробой изоляции, если магнитное поле резко выключить? Время выключения поля $\Delta t=10^{-3}$ с.

22.26. В вертикальном магнитном поле с большой высоты падает кольцо диаметром d , изготовленное из тонкой проволоки. Плоскость кольца все время горизонтальна. Найти установившуюся скорость падения кольца, если индукция поля меняется с высотой по закону $B=B_0(1+\alpha h)$.

§ 23. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Эффективные значения силы переменного тока и переменного напряжения:

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt; \quad U_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt,$$

где T — период тока, i и u — мгновенные значения силы тока и напряжения.

В случае синусоидального тока

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

где I_m и U_m — амплитуды силы тока и напряжения.

При последовательном соединении элементов цепи полное сопротивление переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2},$$

где R , L и C — активное сопротивление, индуктивность и емкость цепи, ω — круговая частота.

Мощность переменного тока:

$$N = I_{\text{эф}} \cdot U_{\text{эф}} \cdot \cos \varphi,$$

где φ — сдвиг фаз между током и напряжением.

Период свободных затухающих колебаний колебательного контура:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}}.$$

Логарифмический декремент затухания:

$$\Theta = \frac{R}{2L} T.$$

Скорость распространения электромагнитных колебаний в изотропной среде диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ — скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме.

23.1. Определить эффективное значение синусоидального тока, если его среднее значение за полпериода 2,0 А.

23.2. Найти эффективное и среднее значение силы тока прямоугольных импульсов, период которых в 4 раза больше их длительности, а максимальное значение 0,80 А.

23.3. Прибор магнитоэлектрической системы показывает среднее значение измеряемой величины за период, а прибор тепловой системы — эффективное значение. Каковы будут показания амперметров этих систем при последовательном их включении в цепь, питаемую от однополупериодного выпрямителя, если амплитудное значение силы тока 5 А?

23.4. Замкнутый контур в виде квадратной рамки со стороной $a=8,0$ см равномерно вращается с угловой скоростью $\omega =$

$=105 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B=$

$=3,0 \cdot 10^{-2}$ Тл. Ось вращения проходит через центр рамки и перпендикулярна линиям поля магнитной индукции. Найти амплитудное и действующее значение ЭДС в контуре.

23.5. Определить емкость конденсатора, который в цепи переменного тока с частотой 50 Гц оказывает такое же сопротивление, как и резистор с сопротивлением 100 Ом.

23.6. Для определения индуктивности дросселя его сначала включают в цепь постоянного тока, а затем в цепь переменного тока частотой $\nu=50$ Гц. Параллельно к дросселю подключен электродинамический вольтметр. Определить индуктивность дросселя, если при прохождении через него постоянного

тока $I_1 = 3,0$ А показание вольтметра $U_1 = 15$ В, а при переменном токе $I_2 = 2,0$ А соответствующее показание $U_2 = 120$ В.

23.7. В сеть напряжением 220 В включены последовательно катушка индуктивностью 0,16 Гн и проводник сопротивлением 2,0 Ом, а также конденсатор емкостью 64 мкФ. Определить силу тока в цепи, если частота его 200 Гц. При какой частоте наступит резонанс напряжений и каковы будут при этом сила тока и напряжение на зажимах катушки и конденсатора?

23.8. Дуга Петрова питается током промышленной частоты с эффективным напряжением 127 В. Определить индуктивность дросселя с активным сопротивлением 1,0 Ом, который нужно включить последовательно с дугой, чтобы получить силу тока 20 А при сопротивлении горячей дуги 2,0 Ом.

23.9. Неоновая лампа, которая зажигается и гаснет при напряжении 84 В, включена в цепь переменного тока промышленной частоты с эффективным напряжением 120 В. Определить время между вспышками лампы и продолжительность вспышки.

23.10. Ртутно-кварцевая лампа ПРК-2 подключается к источнику переменного напряжения частотой 50 Гц через дроссель, рабочее напряжение на котором 180 В, а эффективная сила тока 4,0 А. Определить активное сопротивление дросселя, если его индуктивность 0,10 Гн.

23.11. Конденсатор емкостью 5 мкФ и проводник сопротивлением 150 Ом включены последовательно в цепь переменного тока с напряжением 120 В и частотой 50 Гц. Определить максимальное и эффективное значение силы тока, сдвиг фаз между током и напряжением, а также эффективную мощность.

23.12. Определить эффективное значение силы тока, эффективную мощность и сдвиг фаз между током и напряжением, если проводник сопротивлением 150 Ом и конденсатор емкостью 5,0 мкФ включены параллельно в цепь переменного тока напряжением 120 В и частотой 50 Гц.

23.13. В цепь переменного тока частотой 50 Гц включены катушка индуктивности, вольтметр, амперметр и ваттметр (рис. 23.1). Показания вольтметра, амперметра и ваттметра соответственно 120 В, 10 А и 900 Вт. Определить

коэффициент самоиндукции катушки, ее активное сопротивление и сдвиг фаз между током и напряжением.

23.14. В цепь переменного тока с эффективным напряжением 220 В подключены последовательно катушка индуктивностью 0,50 Гн и активным сопротивлением 10 Ом и конденсатор емкостью 0,50 мкФ. Определить эффективную силу тока и эффективную мощность.

23.15. Три одинаково заряженных конденсатора емкостью $C = 5,0$ мкФ каждый соединяют в батарею и подключают к

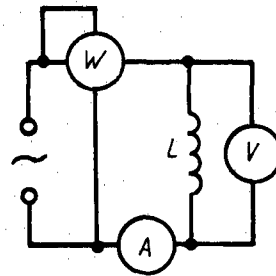


Рис. 23.1

катушке, активное сопротивление которой $R = 20$ Ом и индуктивность $L = 0,02$ Гн. Во сколько раз будут отличаться периоды затухающих колебаний, если конденсаторы один раз соединить параллельно, а второй — последовательно?

23.16. Резонансная частота колебательного контура, состоящего из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, $\nu_0 = 4$ кГц. Определить индуктивность катушки, если полное сопротивление, оказываемое этим контуром переменному току частотой $\nu = 1$ кГц, равно $Z = 1$ кОм, а активное сопротивление катушки $R = 10$ Ом.

23.17. Заряженный конденсатор емкостью 0,50 мкФ подключили к катушке индуктивностью 5,0 мГн. Через какое время от момента подключения катушки энергия электрического поля конденсатора станет равной энергии магнитного поля катушки? Активным сопротивлением катушки пренебречь.

23.18. В колебательном контуре, состоящем из конденсатора и катушки индуктивностью 5,0 мГн, происходят электромагнитные колебания, при которых максимальная сила тока 10 мА. Определить емкость конденсатора, если максимальная разность потенциалов на его обкладках достигает 50 В, а активным сопротивлением катушки можно пренебречь.

23.19. Какое сопротивление может содержать колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью 10 мГн и конденсатора емкостью 4,0 мкФ, чтобы в нем могли еще возникнуть электромагнитные колебания?

23.20. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, который состоит из конденсатора емкостью $C = 2,0$ мкФ и катушки длиной $l = 0,10$ м и радиусом $R = 1,0$ см, содержащей $N = 500$ витков, если магнитная проницаемость среды, заполняющей катушку, равна $\mu = 1$, а сопротивлением катушки можно пренебречь.

23.21. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2,0 мкФ и катушки индуктивностью 0,10 Гн и сопротивлением 10 Ом. Определить логарифмический декремент затухания колебаний.

23.22. Определить активное сопротивление колебательного контура, индуктивность которого $L = 1,0$ Гн, если через $t = 0,10$ с амплитудное значение разности потенциалов на обкладках конденсатора уменьшилось в $n = 4$ раза.

23.23. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, содержащего конденсатор емкостью $C = 0,50$ мкФ, если максимальная разность потенциалов на его обкладках достигает $U_m = 100$ В, а максимальная сила тока в катушке равна $I_m = 50$ мА. Активным сопротивлением катушки пренебречь.

23.24. Какую энергию необходимо подвести к колебательному контуру с логарифмическим декрементом затухания $\Theta = 0,03$, чтобы поддерживать в нем затухающие колебания в течение $t = 1$ ч, если контур состоит из конденсатора емкостью $C = 0,050$ мкФ и катушки индуктивностью $L = 2,0$ мГн, а макси-

мальная сила тока в катушке достигает значения $I_m = 5,0$ мА?

23.25. На какую длину волны настроен радиоприемник, если его приемный контур обладает индуктивностью $1,5$ мГн и емкостью 450 пФ?

23.26. Определить скорость распространения электромагнитных колебаний в стекле, если $\varepsilon = 7$, $\mu = 1$.

23.27. Двухпроводная линия индуктивно связана с генератором электромагнитных колебаний и погружена в спирт. Определить частоту генератора, если расстояние между пучностями в стоячей волне $0,50$ м, а относительные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей спирта соответственно 26 и 1 .

23.28. При подаче напряжения $U_1 = 100$ В на первичную обмотку трансформатора с тороидальным ферритовым сердечником, магнитная проницаемость которого $\mu_1 = 2000$, напряжение на его разомкнутой вторичной обмотке $U_2 = 199$ В. Какое напряжение было бы на разомкнутой вторичной обмотке, если бы магнитная проницаемость сердечника была $\mu_2 = 20$? Рассеяние магнитного потока и потери в сердечнике не учитывать. Коэффициент трансформации трансформатора $k = 2$.

Глава IV

ОПТИКА

§ 24. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

При интерференции двух когерентных волн расстояние между возникающими на экране двумя соседними интерференционными полосами выражается соотношением

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda,$$

где l — расстояние от экрана до источников света, d — расстояние между источниками света.

При отражении от плоскопараллельной пластинки, находящейся в воздухе, оптическая разность хода световых волн:

$$\Delta = 2hn \cos \beta + \frac{\lambda}{2},$$

где h — толщина пластины, α — угол падения лучей, β — угол преломления, n — показатель преломления пластины.

Условие максимумов интенсивности световых волн при интерференции:

$$\Delta = \pm k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$

Условие минимумов:

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Радиусы светлых и темных колец Ньютона:

$$r_m = \sqrt{\frac{R\lambda}{2}(m-1)},$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$

В отраженном свете четным m соответствуют радиусы светлых колец, нечетным — темных, в проходящем свете — наоборот.

24.1. Расстояние между двумя когерентными источниками света ($\lambda = 0,5$ мкм) равно $0,1$ мм. Расстояние между интерференционными максимумами в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние от источников до экрана.

24.2. На бипризму Френеля падает свет ($\lambda = 600$ нм) от источника. Найти расстояние между соседними интерференционными



Рис. 24.1

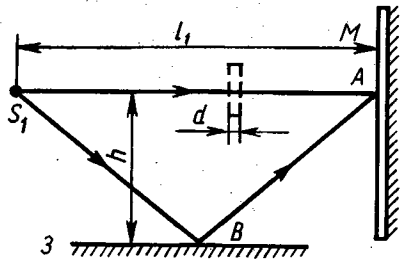


Рис. 24.2

максимумами, образующимися на экране в результате интерференции, если расстояние от источника до призмы 1 м, а от призмы до экрана 4 м. Преломляющий угол призмы $2 \cdot 10^{-3}$ рад, показатель преломления ее $n = 1,5$.

24.3. Найти число N полос интерференции, образованных бипризмой с показателем преломления n и преломляющим углом φ , если длина волны источника λ . Расстояние от источника света до бипризмы a , а от бипризмы до экрана b .

24.4. На зеркала Френеля, поставленные под углом $\alpha = 10^\circ$ (рис. 24.1), падает свет от щели, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от линии пересечения зеркал. Длина волны источника $\lambda = 600$ нм. Отраженный от зеркал свет дает интерференционную картину на экране, расположенном на расстоянии $L = 270$ см от линии пересечения зеркал. Определить расстояние между интерференционными полосами на экране и наибольшую ширину щели, при которой интерференционная картина может наблюдаться.

24.5. Определить угол α между зеркалами Френеля, если расстояние x между максимумами интерференции на экране равно 1 мм, расстояние a от линии пересечения зеркал до экрана 1 м, а до источника $r = 10$ см. Длина волны монохроматического света $\lambda = 0,486$ мкм. Интерферирующие лучи падают на экран нормально.

24.6. Интерференционная картина на экране M получается с помощью схемы, изображенной на рисунке 24.2. Источник S_1 , находящийся на расстоянии $l_1 = 1$ м от экрана, излучает монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). Плоскость зеркала 3 параллельна лучу S_1A и удалена от него на расстояние $h = 2$ мм. Определить, что будет наблюдаться в точке A (усиление или гашение). Как изменится освещенность в этой точке, если на пути луча S_1A , перпендикулярно к нему, поместить плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n = 1,55$) толщиной $d = 6$ мкм?

24.7. На диафрагму с двумя узкими щелями, находящимися на расстоянии $d = 2,5$ мм, падает нормально монохроматический свет. Интерференционная картина образуется на экране, отстоящем от диафрагмы на расстоянии $l = 100$ см. Куда и на какое расстояние сместятся интерференционные полосы, если одну из

щелей закрыть стеклянной пластиной толщиной $h = 1$ мкм и с показателем преломления $n = 1,5$?

24.8. Два когерентных источника света с длиной волны $\lambda = 480$ нм создают на экране интерференционную картину. Если на пути одного из пучков поместить тонкую кварцевую пластину с показателем преломления $n = 1,46$, то интерференционная картина смещается на $m = 69$ полос. Определить толщину d пластины.

24.9. Тонкая пленка с показателем преломления $n = 1,5$ освещается рассеянным светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм. При какой минимальной толщине пленки исчезнут интерференционные полосы?

24.10. На плоской прозрачной поверхности образована тонкая прозрачная пленка толщиной $0,396$ мкм. Какую окраску примет пленка при освещении ее белым светом, падающим под углом 30° ?

Показатель преломления стекла $1,5$, а материала пленки $1,4$.

24.11. На стеклянную пластинку ($n_1 = 1,5$) нанесена прозрачная пленка ($n_2 = 1,4$). На пленку нормально к поверхности падает монохроматический свет ($\lambda = 600$ нм). Какова наименьшая толщина пленки, если в результате интерференции отраженные лучи максимально ослаблены?

24.12. Определить толщину слоя масла на поверхности воды, если при наблюдении под углом 60° к нормали в спектре отраженного света видна значительно усиленная желтая линия с длиной волны $\lambda = 0,589$ мкм.

24.13. Каковы должны быть пределы изменения толщины пластинки с показателем преломления $n = 1,6$, чтобы можно было наблюдать интерференционный максимум 10-го порядка для света с длиной волны $\lambda = 500$ нм?

24.14. Расположенная вертикально клинообразная мыльная пленка наблюдается под углом 90° к вертикали в отраженном свете через красное стекло, пропускающее лучи с длиной волны 631 нм. Расстояние между соседними красными полосами 3 мм. Каково расстояние между соседними синими полосами, если наблюдение вести через синее стекло, пропускающее свет с длиной волны 460 нм?

24.15. В тонкой клинообразной пластинке в отраженном свете при нормальном падении лучей с длиной волны 450 нм наблюдаются темные интерференционные полосы, расстояние между которыми $1,5$ мм. Найти угол между гранями пластины, если показатель преломления пластинки $1,5$.

24.16. При освещении клинообразной пластинки пучком параллельных лучей натриевого пламени ($\lambda_1 = 589$ нм), падающих нормально к поверхности, образуются интерференционные полосы, причем на длине в 13 мм укладывается 46 темных полос. Затем пластину освещают светом с длиной волны $\lambda_2 = 499$ нм. Определить число темных полос, укладывающихся в этом случае на той же длине.

24.17. Воздушный клин, имеющий наибольшую толщину 0,01 мм, образован горизонтальной поверхностью и плоскопараллельной стеклянной пластинкой. При освещении пластинки вертикальными лучами с длиной волны 0,580 мкм наблюдатель видит в отраженном свете интерференционные полосы. После того как в пространство между пластинкой и поверхностью ввели жидкость, число интерференционных полос увеличилось на 12. Определить показатель преломления жидкости. Считать, что из-за малости угла при вершине клина угол падения лучей на границу воздушного клина близок к нулю.

24.18. Почему центр колец Ньютона, наблюдаемых в проходящем свете, обычно светлый?

24.19. В установке для наблюдения колец Ньютона плосковыпуклая линза сделана подвижной и может перемещаться в направлении, перпендикулярном пластинке. Что будет происходить с кольцами Ньютона при удалении и приближении линзы к пластинке? Кольца получаются с помощью монохроматического света.

24.20. На установку для получения колец Ньютона падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). Определить толщину воздушного слоя там, где в отраженном свете наблюдается 5-е светлое кольцо.

24.21. Оптическая сила плосковыпуклой линзы ($n = 1,5$) 0,5 дптр. Линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определить радиус 7-го темного кольца Ньютона в проходящем свете ($\lambda = 0,5$ мкм).

24.22. Две плосковыпуклые линзы прижаты вплотную своими выпуклыми поверхностями, радиусы кривизны которых R_1 и R_2 . Определить радиус r_n n -го темного кольца, если длина падающей световой волны λ . Наблюдение ведется в отраженном свете.

24.23. Несимметричная двояковыпуклая линза лежит одной из своих поверхностей на плоскопараллельной пластинке. При наблюдении колец Ньютона в отраженном свете с $\lambda = 589$ нм радиус r_1 20-го темного кольца оказался равным 2 мм. Когда линзу положили на пластинку другой поверхностью, то радиус r_2 того же темного кольца стал 4 мм. Определить фокусное расстояние линзы, если показатель преломления стекла, из которого она изготовлена, 1,5.

24.24. Каково расстояние между 20-м и 21-м максимумами светлых колец Ньютона, если расстояние между 2-м и 3-м — 1 мм, а наблюдение ведется в отраженном свете?

24.25. Между плосковыпуклой линзой и стеклянной пластинкой, на которой она лежит, нет контакта вследствие попадания пыли. При этом радиус 5-го темного кольца Ньютона 0,8 мм. Если пыль удалить, то радиус этого кольца станет 0,1 см. Найти толщину слоя пыли, если радиус кривизны линзы 10 см. Наблюдение ведется в проходящем свете.

24.26. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней

плосковыпуклой линзой находится жидкость. Каков ее показатель преломления, если при наблюдении в отраженном свете ($\lambda = 600$ нм) радиус 10-го темного кольца Ньютона 2,1 мм? Радиус кривизны линзы 1 м.

24.27. Интерферометр, изображенный на рисунке 24.3, служит для измерения показателя преломления прозрачных веществ.

Здесь S — щель, на которую падает монохроматический свет ($\lambda = 598$ нм); D — диафрагма с двумя щелями; длина трубок A и B , заполненных воздухом, равна 10 см. Если трубку A заполнить аммиаком, то интерференционная картина на экране M сместится вверх на $N = 10$ полос. Определить показатель преломления аммиака.

24.28. Определить показатель преломления пленки, которая просветляла бы поверхность стекла ($n = 1,67$), находящегося в воздухе.

24.29. Поверхность стеклянной пластинки просветлена для желтой области спектра. Показатель преломления просветляющей пленки для желтых лучей 1,28. Какую долю падающего потока отразит пластинка в областях спектра $\lambda_1 = 600$ нм, $\lambda_2 = 400$ нм? Показатель преломления стекла и пленки для фиолетовых лучей считать на 0,01 больше соответствующих показателей преломления для желтых лучей.

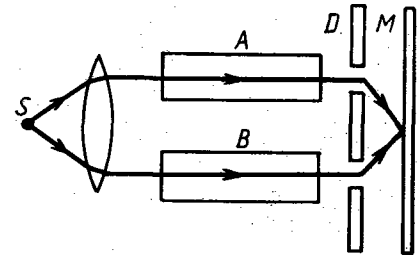


Рис. 24.3

§ 25. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Радиус k -й зоны Френеля при прохождении сферической волны через круглое отверстие:

$$\rho_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b} k\lambda},$$

где a — расстояние диафрагмы с круглым отверстием от точечного источника света, b — расстояние диафрагмы от экрана, на котором наблюдается дифракционная картина, k — номер зоны Френеля.

Условие главных максимумов интенсивности в случае френгоферовой дифракции на дифракционной решетке при нормальном падении лучей:

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda,$$

где d — период решетки, k — номер главного максимума, φ — угол дифракции.

Угловая дисперсия дифракционной решетки:

$$D_\varphi = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi},$$

где $\delta\varphi$ — угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\delta\lambda$.

Линейная дисперсия дифракционной решетки:

$$D_l = \frac{\delta l}{\delta \lambda},$$

где δl — линейное расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\delta\lambda$.

Для малых углов дифракции

$$D_l \approx FD_\varphi.$$

Разрешающая сила объектива телескопа:

$$R = \frac{D}{1,22\lambda},$$

где D — диаметр входного зрачка объектива.

Формула Вульфа — Брэгга:

$$2d \sin \psi = k\lambda,$$

где d — расстояние между атомными плоскостями кристалла, ψ — угол скольжения, k — порядок спектра.

25.1. Перед диафрагмой с круглым отверстием радиусом $r=1,0$ мм поместили точечный источник света ($\lambda=0,50$ мкм). Найти расстояние b от диафрагмы до точки наблюдения, для которой число зон Френеля в отверстии $n=4$. Расстояние от источника света до диафрагмы $a=1,0$ м.

25.2. Радиус 4-й зоны Френеля для плоского волнового фронта $r_4=3$ мм. Определить радиус 12-й зоны из той же точки наблюдения.

25.3. Найти углы φ , определяющие положение минимумов при фраунгоферовой дифракции, если плоская волна λ падает на щель шириной a по направлению, составляющему угол α с нормалью к плоскости щели.

25.4. В точке A (рис. 25.1) находится точечный источник монохроматического света ($\lambda=500$ нм). Диафрагма с отверстием радиусом 1 мм перемещается из точки, отстоящей от A на 50 см, в точку, отстоящую от A на 1,5 м. Сколько раз будет наблюдаться затемнение в точке B , если $AB=2$ м?

25.5. На щель шириной $a=0,1$ мм падает нормально пучок монохроматического света ($\lambda=500$ нм). Дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся в фокальной плоскости линзы, оптическая сила которой $D=5$ дптр. Найти расстояние между минимумами во 2-м порядке.

25.6. Свет от точечного монохроматического источника падает на диафрагму с круглым отверстием, радиус которого

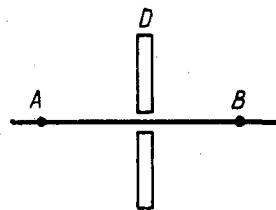


Рис. 25.1

можно менять произвольно. На экране, расположенном на расстоянии $l_1=125$ см от диафрагмы, получилась дифракционная картина. Найти длину волны падающего света, если в центре дифракционной картины максимум наблюдается при $r_1=1$ мм, а следующий за ним — при $r_2=1,29$ мм. Расстояние от источника до диафрагмы $l_2=100$ см.

25.7. Дифракционная решетка содержит 100 штрихов на 1 мм длины. Определить длину волны монохроматического света, падающего на решетку нормально, если угол между двумя фраунгоферовыми максимумами 1-го порядка 8° .

25.8. Какой наибольший порядок спектра натрия ($\lambda=590$ нм) можно наблюдать при помощи дифракционной решетки, имеющей 500 штрихов на 1 мм, если свет падает на решетку под углом 30° ?

25.9. Вычислить наибольший угол, на который дифрагирует пучок монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 10 000 штрихов на 1 см при ширине в 4 см. Длина волны падающего света 546 нм.

25.10. Постоянная дифракционной решетки, установленной в спектрометре, 2 мкм. Под каким углом к оси коллиматора следует установить зрительную трубу для наблюдения спектральной линии с длиной волны 410 нм?

25.11. На каком расстоянии друг от друга будут находиться на экране две линии спектра ртути с длинами волн 577 и 579 нм в спектре 1-го порядка, полученном при помощи дифракционной решетки с периодом 4 мкм? Фокусное расстояние линзы, проецирующей спектр на экран, 60 см. Лучи падают на решетку нормально.

25.12. Период дифракционной решетки 4 мкм. Дифракционная картина наблюдается с помощью линзы с фокусным расстоянием 40 см. Определить длину волны падающего нормально на решетку света, если первый максимум получается на расстоянии 5 см от центрального.

25.13. Спектры 2-го и 3-го порядков в видимой области от дифракционной решетки частично перекрываются. Какой длине волны в спектре 3-го порядка соответствует $\lambda=700$ нм в спектре 2-го порядка?

25.14. На дифракционную решетку с периодом 2 мкм падает нормально свет, пропущенный сквозь светофильтр. Фильтр пропускает волны длиной от 500 до 600 нм. Будут ли спектры различных порядков накладываться друг на друга?

25.15. Под углом $\alpha=30^\circ$ наблюдается 4-й максимум для длины волны $\lambda=0,644$ мкм. Определить постоянную дифракционной решетки и ее ширину, если она позволяет разрешить $\Delta\lambda=0,322$ нм.

25.16. Показать, что если период решетки d соизмерим с шириной щели a , так что $d=na$, то в дифракционном спектре исчезают все максимумы, номера которых кратны n .

25.17. Какова должна быть постоянная дифракционной ре-

шетки, чтобы в спектре 1-го порядка при нормальном падении лучей можно было разделить D -дублет натрия (589 и 589,6 нм) так, чтобы угол расхождения между компонентами дублета равнялся $5'$?

25.18. Дифракционная решетка шириной 2 см имеет постоянную 5 мкм. Определить разрешающую способность этой решетки в 3-м порядке. Какова наименьшая разность длин волн двух разрешаемых спектральных линий в желтой области ($\lambda = 600$ нм)?

25.19. Сравнить разрешающие способности дифракционных решеток, если одна из них имеет 420 штрихов на 1 мм при ширине 2 см, а вторая — 700 штрихов на 1 мм при ширине 4,8 см.

25.20. Определить угловую дисперсию дифракционной решетки с периодом 2 мкм для спектра 2-го порядка, если $\lambda = 500$ нм.

25.21. Какова линейная дисперсия дифракционной решетки для длины волны 0,589 мкм в спектре 2-го порядка, если постоянная решетки 4 мкм, а фокусное расстояние проецирующей линзы 50 см.

25.22. На вершине телевизионной башни находятся на расстоянии $l = 20$ см две красные лампы ($\lambda = 640$ нм). Каким должен быть наименьший диаметр объектива зрительной трубы, чтобы эти лампы можно было увидеть раздельно с расстояния $r = 15$ км?

25.23. Каково должно быть минимальное расстояние между двумя точками на поверхности Марса, чтобы их можно было различить в телескоп с диаметром объектива 60 см ($\lambda = 500$ нм)? Марс находится в великом противостоянии, т. е. расстояние от Земли 56 Гм.

25.24. Диаметр зеркального объектива телескопа Крымской обсерватории равен 2,6 м. Определить разрешающую способность телескопа. Принять, что глаз наиболее чувствителен к длине волн 550 нм.

25.25. Пучок света ($\lambda = 600$ нм) от находящегося на Земле лазера фокусируют с помощью телескопа, диаметр объектива которого 2 м, на лунный кратер. Каков будет размер светового пятна на Луне, если расстояние от Луны до Земли 384 400 км? Влиянием атмосферы пренебречь.

25.26. При каком напряжении работает рентгеновская трубка, если ее излучение падает на кристалл кальцита (CaCO_3)? Наименьший угол между поверхностью кристалла и пучком рентгеновских лучей, при котором можно отметить зеркальное отражение, $2^\circ 36'$. Соответствующее межплоскостное расстояние принять равным постоянной решетки кальцита ($d = 304$ пм).

25.27. При освещении кристалла хлорида калия (KCl) монохроматическими рентгеновскими лучами с длиной волны 145 пм и при угле между пучком рентгеновских лучей и поверхностью кристалла $14^\circ 20'$ появляется при зеркальном отражении максимум 1-го порядка. Найти расстояние между соседними атомными плоскостями кристалла.

25.28. Какова постоянная кристаллической решетки у хлорида натрия (NaCl), если монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны 71,2 пм зеркально отражается от его естественной грани плоскости спайности? Максимум 1-го порядка наблюдается при угле $7^\circ 18'$.

25.29. На кристалл кальцита (CaCO_3) падают рентгеновские лучи длиной волны 32 пм. При каком угле между пучком лучей и поверхностью кристалла будет наблюдаться интерференционное зеркальное отражение 1-го порядка? Соответствующее расстояние между атомными плоскостями принять равным постоянной решетки кальцита ($d = 304$ пм).

25.30. Рентгеновское излучение падает на естественную грань кристалла каменной соли (NaCl), от которой происходит зеркальное отражение 2-го порядка. Найти длину волны рентгеновского излучения, если угол между пучком рентгеновских лучей и поверхностью кристалла $11^\circ 36'$. Постоянная решетки кристалла каменной соли 280 пм.

§ 26. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{R} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где d и f — соответственно расстояния предмета и изображения от полюса зеркала, F — фокусное расстояние зеркала, R — радиус кривизны зеркала.

Закон преломления света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

где α — угол падения, β — угол преломления, n_{21} — относительный показатель преломления второй среды относительно первой, n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй сред.

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где d и f — соответственно расстояния от оптического центра линзы до предмета и до изображения.

Оптическая сила тонкой линзы:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где n — относительный показатель преломления линзы.

Оптическая сила системы двух тонких линз, сложенных вместе:

$$D = D_1 + D_2,$$

где D_1 и D_2 — оптические силы линз.

Поперечное увеличение в зеркалах и линзах:

$$\Gamma = \frac{H}{h},$$

где h и H — высота предмета и высота изображения.

Увеличение лупы:

$$\Gamma = \frac{L}{F},$$

где L — расстояние наилучшего зрения, F — фокусное расстояние лупы.

Увеличение микроскопа:

$$\Gamma = \frac{Ld}{F_1 F_2},$$

где L — расстояние наилучшего зрения, d — расстояние между объективом и окуляром, F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Увеличение телескопа:

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_2},$$

где F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Отражение света

26.1. Во многих измерительных приборах роль стрелки играет световой луч, отраженный от маленького плоского зеркальца. На какой угол повернулось зеркальце, если отраженный луч передвинулся по шкале на 32 мм? Расстояние от шкалы до зеркальца 2 м.

26.2. Доказать, что для получения изображения человека во весь рост в плоском зеркале высота зеркала должна быть не менее половины роста человека.

26.3. Определить угол между двумя плоскими зеркалами, если точечный источник света и два его изображения в этих зеркалах лежат в вершинах равностороннего треугольника. Построить чертеж.

26.4. Как расположить два плоских зеркала, чтобы при любом угле падения падающий луч и луч, отразившийся от обоих зеркал, были параллельны друг другу?

26.5. С помощью сферического зеркала получено изображение предмета A (рис. 26.1). Построением определить положение и фокус зеркала; вогнутое оно или выпуклое?

26.6. Известно расположение предмета A и изображения A' относительно полюса P сферического зеркала (рис. 26.2). Найти положение зеркала и его фокус.

26.7. Определить фокусное расстояние вогнутого сферического зеркала, если оно дает действительное изображение предмета, увеличенное в 4 раза. Расстояние между предметом и его изображением 15 см.



Рис. 26.1



Рис. 26.2

26.8. Радиус кривизны вогнутого зеркала 40 см. Найти положение предмета, при котором его изображение будет действительным и увеличенным в 2 раза; мнимым и увеличенным в 2 раза.

26.9. Предмет расположен на расстоянии 15 см от вершины вогнутого зеркала на его оптической оси. Изображение получилось на расстоянии 30 см от зеркала. Найти, куда и на сколько сместится изображение, если предмет приблизить к зеркалу на 1 см.

26.10. На главной оптической оси сферического зеркала радиусом 40 см помещен точечный источник света S на расстоянии 30 см от зеркала. На каком расстоянии от вогнутого зеркала нужно поставить плоское зеркало, чтобы лучи, отраженные от вогнутого, а затем и плоского зеркала, прошли через точку S ?

26.11. Сходящийся пучок лучей падает на выпуклое зеркало так, что точка пересечения продолжений этих лучей находится на оси зеркала на расстоянии 20 см от него. После отражения эти лучи пересекают оптическую ось на расстоянии 0,6 м от зеркала. Найти фокусное расстояние зеркала.

26.12. Два одинаковых вогнутых сферических зеркала поставлены друг против друга так, что их главные фокусы совпадают. Точечный источник света помещен на общей оптической оси на расстоянии a от первого зеркала. Где получится изображение после отражения лучей от обоих зеркал?

26.13. Человек смотрит в вогнутое сферическое зеркало и видит прямое изображение своего глаза. Угловой размер этого изображения в 1,5 раза больше углового размера изображения, которое получилось бы в плоском зеркале, помещенном на таком же расстоянии, равно 20 см. Найти радиус кривизны зеркала.

26.14. Точечный источник света равномерно движется по окружности радиусом 0,5 м. Линейная скорость его вращения 3 м/с. На расстоянии в 5 м от центра окружности перпендикулярно оси вращения расположено сферическое зеркало радиусом кривизны 2 м. Найти ускорение, с которым движется изображение источника в зеркале.

Преломление света

26.15. Шест высотой 1 м вбит вертикально в дно пруда так, что он целиком находится под водой. Определить длину тени от шеста на дне пруда, если лучи солнца падают на поверхность воды под углом 30° .

26.16. Луч белого света падает под углом 60° на плоско-параллельную стеклянную пластинку. Крайний красный и фиоле-

товый лучи светового пучка, выходящего из противоположной грани пластинки, отстоят друг от друга на расстоянии 0,3 мм. Определить толщину пластинки, если показатель преломления стекла для крайних красных лучей 1,51, а для крайних фиолетовых 1,53.

26.17. Луч света преломляется на границе воздух — стекло. При каком угле падения преломленный луч образует с отраженным угол в 90° ? Каков наименьший угол между отраженным и преломленным лучами?

26.18. На сколько меняется длина волны красных лучей при переходе из воздуха в стекло, если показатель преломления стекла для этих лучей 1,51, а частота их $\nu = 4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$?

26.19. Определить предельный угол, при котором происходит полное внутреннее отражение в алмазе.

26.20. В воде идут два параллельных луча. Первый луч на границе вода — воздух испытывает полное внутреннее отражение. На пути второго луча на поверхности воды расположена плоскопараллельная стеклянная пластинка. Выйдет ли второй луч из воды или тоже испытает полное отражение?

26.21. Человек посмотрел на дно водоема в вертикальном направлении сверху вниз и определил его кажущуюся глубину 90 см. Чему равна действительная глубина водоема?

26.22. На поверхности слоя четыреххлористого углерода ($n_1 = 1,46$) толщиной 4,0 см плавает слой воды ($n_2 = 1,33$) толщиной 2,0 см. На какой кажущейся глубине будет находиться дно сосуда при нормальном падении луча?

26.23. В плоском зеркале видно изображение свечи. Что произойдет с ним, если между зеркалом и свечой поставить плоскопараллельную стеклянную пластинку?

26.24. Пучок параллельных лучей падает на поверхность воды под углом 30° . Ширина пучка в воздухе 5 см. Найти ширину пучка в воде.

26.25. На какой глубине под водой находится водолаз, если он видит отраженными от поверхности воды те части горизонтального дна, которые расположены от него на расстоянии 15 м и больше? Рост водолаза 1,7 м.

26.26. На высоте h над поверхностью воды расположен точечный источник света S . Где будет находиться изображение S' этого источника, даваемое плоским зеркальным дном сосуда, если смотреть по вертикали вниз? Глубина сосуда с водой d , показатель преломления воды 1,33.

26.27. Луч света 1 падает нормально на грань стеклянного клина с малым углом при вершине (рис. 26.3). На какой угол повернется преломленный луч при повороте падающего луча на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка?

26.28. На стеклянную призму с преломляющим углом 60° и показателем преломления 1,5 падает луч света под углом 30° . Каков угол преломления луча при выходе его из призмы?

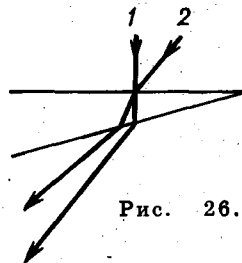


Рис. 26.3

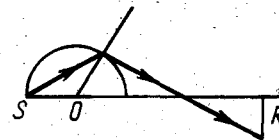


Рис. 26.4

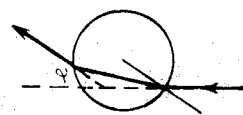


Рис. 26.5

26.29. Белый свет, пройдя через призму, разлагается в спектр. Почему же призма полного отражения дает неокрашенные изображения?

26.30. Преломляющий угол стеклянной призмы 60° . Под каким углом лучи должны падать на призму, чтобы выходить из нее скользая вдоль поверхности противоположной грани? Показатель преломления стекла 1,6.

26.31. У призмы с преломляющим углом 30° одна грань посеребрена. Луч, падающий на другую грань под углом 45° , после преломления и отражения от посеребренной грани вернулся назад по прежнему направлению. Определить показатель преломления материала призмы.

26.32. Внутри сплошного шара радиусом R с показателем преломления $n = 2$ слева от центра вблизи поверхности находится точечный источник света S (рис. 26.4). На каком расстоянии справа от центра шара радиус светового пучка, вышедшего из шара, будет равен R ?

26.33. Луч света из воздуха попадает на однородный прозрачный шар, проникает в него и достигает поверхности раздела шар — воздух. Какой угол φ составляет вышедший луч с падающим на шар, если угол падения луча 26° , а угол преломления 17° (рис. 26.5)?

Линзы и оптические системы

26.34. На рисунке 26.6 показана тонкая собирающая линза, находящаяся в воздухе; F_1, F_2 — ее фокусы. Найдите построением ход произвольного луча AB после линзы.

26.35. Построить изображение предмета AB в рассеивающей линзе (рис. 26.7).

26.36. Ход луча 1, прошедшего рассеивающую линзу, изображен на рисунке 26.8. Как пойдет луч 2 после линзы?

26.37. На рисунке 26.9 показано положение двух точек A и B и их изображений A' и B' , которые дает тонкая линза. Найти построением положения линзы и ее фокусов.

26.38. Найти отношение оптических сил линз, изготовленных из стекла и алмаза с одинаковыми радиусами кривизны.

26.39. Доказать, что наименьшее расстояние между предметом и его действительным изображением в собирающей линзе $4F$, где F — фокусное расстояние линзы.

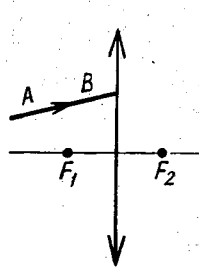


Рис. 26.6

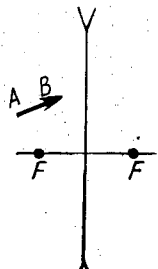


Рис. 26.7

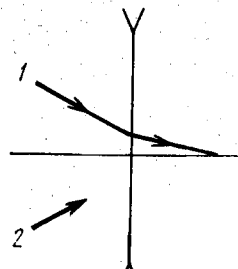


Рис. 26.8

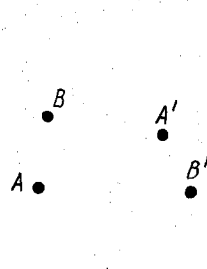


Рис. 26.9

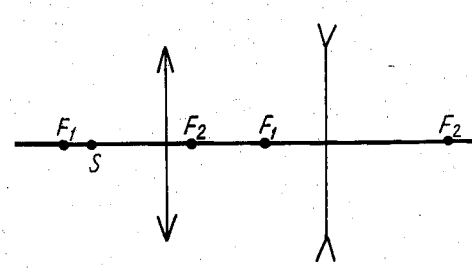


Рис. 26.10

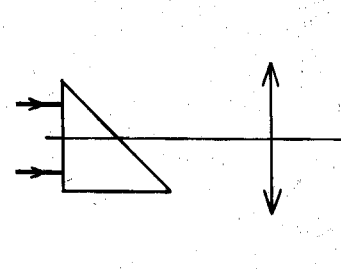


Рис. 26.11

26.40. Собирающая линза дает резкие изображения на экране при двух положениях линзы, отстоящих друг от друга на расстоянии k . Доказать, что в этом случае $F = (l^2 - k^2)/4l$, где l — расстояние между предметом и экраном, остающееся постоянным.

26.41. Как, не измеряя фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз, сравнить их оптические силы?

26.42. Как расположить источник света относительно собирающей линзы и вогнутого зеркала, чтобы получить параллельный пучок лучей?

26.43. Где и какого размера получится изображение предмета высотой 2 см, помещенного на расстоянии 15 см от собирающей линзы с фокусным расстоянием 0,1 м?

26.44. Найти фокусное расстояние собирающей линзы, если произведение расстояния от предмета до переднего фокуса ее на расстояние от заднего фокуса до изображения равно l .

26.45. Оптическая сила стеклянной линзы в воздухе 5,5 дптр, а в жидкости 1,63 дптр. Каков показатель преломления жидкости? Показатель преломления линзы 1,5.

26.46. Фокусное расстояние двояковыпуклой стеклянной линзы ($n=1,5$), у которой радиусы кривизны поверхности одинаковы, равно 25 см. Где соберутся падающие на линзу параллельные оптической оси лучи, если позади линзы находится вода?

26.47. Собирающая линза с показателем преломления 1,5 дает действительное изображение на расстоянии 0,1 м от нее. Если предмет и линзу погружают в воду, не изменяя расстояния между ними, то изображение получается на расстоянии 0,6 м от линзы. Найти фокусное расстояние линзы. Показатель преломления воды 1,33.

26.48. Собирающая линза дает на экране изображение предмета. Между линзой и экраном поместили плоскопараллельную пластинку толщиной 3 см и показателем преломления 1,5. В каком направлении и на сколько нужно сдвинуть экран, чтобы снова получить отчетливое изображение предмета?

26.49. Высота изображения, полученного с помощью собирающей линзы, H_1 . Не изменяя расстояния между предметом

и экраном, передвиганием линзы добиваются второго четкого изображения предмета. Высота этого изображения H_2 . Найти действительную высоту предмета.

26.50. Продольная хроматическая aberrация симметричной собирающей линзы 0,022 м. Определить радиус кривизны линзы, если показатель преломления этого сорта стекла для красных лучей 1,57, а для фиолетовых 1,60.

26.51. Как изменится фокусное расстояние линзы, если ее равномерно нагреть?

26.52. Как расположить собирающую и рассеивающую линзы, чтобы параллельные лучи, пройдя через них, остались параллельными? Всегда ли возможно решение этой задачи?

26.53. С помощью построения найдите изображение светящейся точки S (рис. 26.10).

26.54. Излучение паров натрия параллельным пучком падает на призму с преломляющим углом 60° . Изображение источника в виде тонких спектральных линий получается в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 50 см. Определить, на каком расстоянии друг от друга лежат две желтые спектральные линии, если для одной из них показатель преломления равен 1,48810, а другой на 10^{-5} больше. Призма стоит в положении наименьшего отклонения.

26.55. На столе поставлены стеклянная призма с преломляющим углом $\varphi=45^\circ$ и показателем преломления n и тонкая линза с фокусным расстоянием F . Главная оптическая ось линзы перпендикулярна вертикальной грани призмы, на которую направлен горизонтальный параллельный пучок света (рис. 26.11). На каком расстоянии x от главной оптической оси находится точка, в которой сходятся лучи, прошедшие сквозь призму и линзу?

26.56. Две собирающие линзы с фокусными расстояниями $F_1=12$ см и $F_2=7$ см имеют общую оптическую ось и находятся на расстоянии l друг от друга. Предмет длиной 2 см находится в фокальной плоскости первой линзы на расстоянии $F+l$ от второй. Найти размер изображения.

26.57. Собирающая линза с фокусным расстоянием 10 см и рассеивающая линза с фокусным расстоянием 20 см, имеющие

общую главную оптическую ось, находятся на расстоянии 30 см друг от друга. На расстоянии 10 см от рассеивающей линзы со стороны, противоположной собирающей линзе, находится предмет. Определить расстояние между изображением предмета, созданным обеими линзами, и собирающей линзой.

26.58. За собирающей линзой с фокусным расстоянием F перпендикулярно оптической оси линзы на расстоянии l от нее расположено плоское зеркало. Перед линзой на расстоянии d находится точечный источник света S . Определить положение изображения. При каких значениях d изображение будет действительным и при каких мнимым?

26.59. Цилиндрический сосуд, закрытый с обоих концов, поместили на наклонную плоскость, составляющую угол $\theta = 30^\circ$ с горизонтом (рис. 26.12). В цилиндре находится собирающая линза с фокусным расстоянием $F = 10$ см. Фокальная плоскость линзы совпадает с верхним торцом цилиндра. В сосуде находится

жидкость с показателем преломления $n = \sqrt{3}$. Из точки S на дне сосуда выходит вертикально луч света. На какое расстояние сместится след этого луча, когда цилиндр будет скользить без трения по наклонной плоскости?

26.60. Из стекла с показателем преломления 1,5 сделана толстая линза. Радиус ее первой выпуклой поверхности 20 см, радиус второй, которая может быть как выпуклой, так и вогнутой, 5 см. Какова толщина линзы, если параллельный пучок света после прохождения линзы остается параллельным?

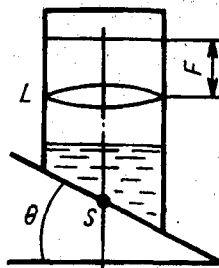


Рис. 26.12

Оптические приборы

26.61. Оптическая сила очков $+2,5$ дптр. Какие линзы у этих очков и какой дефект зрения они исправляют?

26.62. Человек при чтении держит книгу на расстоянии 50 см. Какой оптической силы очки ему нужны?

26.63. На сколько изменяется оптическая сила нормального глаза человека, если он переводит глаза от книги, которую читал, на рисунок, висящий на стене на расстоянии 2 м от глаза?

26.64. Объектив, состоящий из собирающей и рассеивающей линз, сложенных вплотную, используется как лупа с увеличением в 4 раза. Определить оптическую силу каждой линзы объектива, если известно, что оптическая сила собирающей линзы в 4 раза больше (по абсолютному значению) оптической силы рассеивающей линзы.

26.65. Какое увеличение можно получить при помощи проекционного фонаря, объектив которого имеет главное фокусное

расстояние 40 см, если расстояние от объектива до экрана 10 м?

26.66. Фокусное расстояние объектива микроскопа 3 мм. Предмет находится от объектива на расстоянии 3,1 мм. Найти увеличение микроскопа, если фокусное расстояние окуляра 5 см.

26.67. Как нужно расположить объектив и окуляр микроскопа, чтобы через них можно было видеть звезду?

26.68. Фокусные расстояния объектива и окуляра микроскопа соответственно 5 мм и 5 см. Предмет помещен на расстоянии 0,1 мм от главного фокуса объектива. Найти длину тубуса микроскопа и его увеличение для нормального глаза.

26.69. Микроскоп дает увеличение в 640 раз. Предмет отстоит от объектива на 0,41 см. Фокусное расстояние объектива 0,4 см. Определить фокусное расстояние окуляра и длину тубуса микроскопа.

26.70. С какого расстояния нужно фотографировать здание длиной 50 м, чтобы весь его фасад уместился на кадре пленки размером 24×36 мм? Фокусное расстояние объектива 50 мм.

26.71. При аэрофотосъемках используют фотоаппарат, объектив которого имеет фокусное расстояние 8 см. Минимальный размер различных деталей изображения на фотопленке (разрешающая способность пленки) 10^{-2} мм. На какой высоте должен лететь самолет, чтобы на фотографии можно было различить листья деревьев размером 5 см? При какой скорости самолета изображение еще не будет размытым, если время экспозиции 10^{-3} с?

26.72. Зрительная труба настроена для наблюдения Луны. Чтобы рассмотреть в нее предметы, расположенные на расстоянии 100 м, окуляр нужно передвинуть на 2,5 см. Чему равно фокусное расстояние объектива?

26.73. Луна видна невооруженным глазом под углом $31'$. Под каким углом она видна в телескоп, если фокусное расстояние объектива 2 м, а фокусное расстояние окуляра 0,1 м?

26.74. Телескоп, имеющий окуляр с фокусным расстоянием 50 мм, дает угловое увеличение в 60 раз. Каково угловое увеличение одного объектива, если убрать окуляр, а действительное изображение, созданное объективом, рассматривать невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения?

26.75. Перед объективом зрительной трубы помещен предмет на расстоянии $a > F_1$. Отношение фокусных расстояний объектива и окуляра 10. Труба установлена на бесконечность. Найти линейное увеличение. Каков характер изображения?

26.76. Между источником света и зрительной трубой помещена рассеивающая линза с фокусным расстоянием $F_1 = -15$ см на расстоянии $d = 85$ см от источника. Где в промежутке между источником и рассеивающей линзой нужно поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием $F_2 = 16$ см, чтобы источник был резко виден в трубу, установленную на бесконечность? При каком из возможных положений линзы изображение в трубе будет иметь наибольшие угловые размеры?

§ 27. ФОТОМЕТРИЯ

Освещенность E характеризуется световым потоком, падающим на единицу площади:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Точечный изотропный источник силой света I создает на поверхности, отстоящей на расстоянии r , освещенность

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi,$$

где φ — угол падения лучей.

Светимость численно равна световому потоку, испускаемому единицей поверхности светящегося тела:

$$M = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Если светимость тела обусловлена его освещенностью, то

$$M = \rho E,$$

где ρ — коэффициент отражения.

Яркость, численно равная отношению силы света с элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, которая перпендикулярна направлению наблюдения, определяется по формуле:

$$L = \frac{dI}{dS \cos \Theta},$$

где Θ — угол между нормалью к элементу поверхности и направлением наблюдения.

Если яркость не зависит от направления, то светимость и яркость связаны соотношением

$$M = \pi L.$$

27.1. Во сколько раз в Минске освещенность поверхности Земли 22 декабря меньше, чем 22 июня? Высота Солнца 22 июня $59^\circ 37'$, а 22 декабря $12^\circ 43'$.

27.2. Определить полный световой поток, даваемый изотропным точечным источником, если на расстоянии 2,00 м от него освещенность 15,0 лк.

27.3. Точечный источник света, помещенный на расстоянии a от плоскости экрана, создает в центре его освещенность E . Как изменится освещенность в центре экрана, если по другую сторону источника на расстоянии $a/2$ поместить вогнутое зеркало радиусом a ?

27.4. Над горизонтальной поверхностью, освещенной точечным источником силой света 60 кд, на пути лучей поместили собирающую линзу так, чтобы источник находился в ее фокусе.

Определить оптическую силу линзы, если освещенность поверхности под источником света 15 лк.

27.5. На расстоянии 1 м от точечного источника находится экран. Чтобы увеличить его освещенность, по другую сторону от источника света на таком же расстоянии поместили идеально отражающее плоское зеркало, которое отражает свет на экран. Какую освещенность создает этот источник в центре экрана, если его сила света 5 кд?

27.6. Над центром квадратной спортивной площадки на высоте 5 м висит лампа. Рассчитать, на каком расстоянии от центра площадки освещенность поверхности земли в 2 раза меньше, чем в центре. Считать, что сила света лампы по всем направлениям одинакова.

27.7. Во сколько раз освещенность в лунную ночь в полнолуние меньше, чем в солнечный день? Высота Солнца и Луны над горизонтом одинакова. Считать, что освещенная полусфера Луны равномерно рассеивает свет в пространство. Расстояние от Луны до Земли считать равным 400 Мм, а радиус Луны $R_{\text{л}} = 2$ Мм.

27.8. Собирающая линза дает изображение предмета натурального размера. Во сколько раз уменьшится освещенность изображения предмета, если путем передвижения линзы и предмета увеличить площадь изображения в 9 раз?

27.9. При фотографировании объекта, освещенного двумя лампами мощностью 150 Вт каждая на расстоянии 4 и 5 м от него, требуется экспозиция 8 с. Какова должна быть экспозиция при фотографировании того же объекта, освещенного одной такой лампой, которая находится на расстоянии 3 м?

27.10. Предмет фотографируют с уменьшением в 2 раза. Как изменится освещенность фотопленки, если снимать этот предмет в натуральную величину? Диаметр объектива считать малым по сравнению с расстоянием до предмета и при подсчете телесного угла площадь линзы считать равной площади соответствующего шарового сегмента.

27.11. Картину фотографируют сначала целиком с большого расстояния, а затем отдельные ее детали в натуральную величину. Во сколько раз нужно изменить время экспозиции при фотографировании деталей?

27.12. При фотографировании предмета в натуральную величину экспозиция равна 2 с. Какой должна быть экспозиция, если предмет нужно фотографировать с увеличением в 5 раз?

27.13. Астрономическая камера для фотографирования Солнца имеет объектив с фокусным расстоянием 10 м. Перед объективом расположена круглая диафрагма диаметром 5 см. Применяемая фотопленка имеет чувствительность 10 лк·с. Каким должно быть при этих условиях время экспозиции? Известно, что прямые солнечные лучи создают на перпендикулярной к ним площадке освещенность $E = 40$ клк. Угловой диаметр Солнца принять равным 0,01 рад.

27.14. Маленький объект фотографируют в двух масштабах: с расстояния $3F$, где F — фокусное расстояние объектива, и с расстояния $5F$. Во сколько раз надо изменить диаметр диафрагмы объектива, чтобы освещенность изображения на пленке в обоих случаях была одинаковой? Считать, что диаметр объектива много меньше его фокусного расстояния.

27.15. Определить силу света лампы, находящейся внутри матового плафона сферической формы, радиус которого 8 см. Яркость такого светильника 4480 кд/м^2 , коэффициент потерь $k = 0,1$.

27.16. В лампе, сила света которой 85 кд, светящимся телом является накаливаемый шарик диаметром 3 мм. Найти яркость поверхности лампы, если сферическая колба сделана из прозрачного стекла; из матового стекла. Диаметр колбы 6 см. Потерей света в оболочке колбы пренебречь.

27.17. Светящийся диск радиусом 3 см имеет яркость $L = 4 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2$, не зависящую от направления. Определить освещенность в точке, отстоящей на расстоянии 20 см от центра диска, в направлении, нормальном к поверхности диска. Какая ошибка будет сделана, если при вычислении освещенности диск считать точечным источником, сила света которого $\pi L r^2$, расположенным в центре диска радиусом r ?

§ 28. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

При отражении естественного света от диэлектрика имеют место формулы Френеля:

$$I_{\perp} = 0,5 I_0 \left[\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2, \quad I_{\parallel} = 0,5 I_0 \left[\frac{\tg(\alpha - \beta)}{\tg(\alpha + \beta)} \right]^2,$$

где I_0 — интенсивность падающего естественного света, I_{\perp} — интенсивность отраженного света, у которого колебания вектора напряженности \vec{E} световой волны перпендикулярны плоскости падения, I_{\parallel} — интенсивность отраженного света, у которого колебания вектора напряженности \vec{E} световой волны параллельны плоскости падения, α — угол падения, β — угол преломления.

Коэффициент отражения данной поверхности:

$$R = \frac{(n - n_0)^2}{(n + n_0)^2},$$

где n_0 — показатель преломления среды, в которой распространяется свет, n — показатель преломления среды, от поверхности которой происходит отражение.

При отражении света от диэлектрика полная поляризация отраженного луча наступает при условии

$$\tg \alpha_B = n \text{ — закон Брюстера,}$$

где α_B — угол падения лучей, n — относительный показатель преломления.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор (закон Малюса):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где φ — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, I_0 — интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

Угол поворота плоскости поляризации $\varphi = \alpha l$, где α — постоянная вращения, зависящая от природы вещества и длины световой волны, l — расстояние, пройденное световым лучом в веществе.

Для растворов $\varphi = \alpha' l C$, где C — концентрация вещества в растворе, α' — удельное вращение.

28.1. Чему равен угол полной поляризации вещества, у которого предельный угол полного внутреннего отражения 42° ?

28.2. Естественный луч падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку. Угол падения равен углу полной поляризации. Какую часть интенсивности падающего естественного света составит при этом интенсивность отраженного луча? Показатель преломления стекла 1,52.

28.3. Естественный свет падает на стеклянную призму. Определить угол α между гранями призмы (рис. 28.1), если отраженный луч максимально поляризован.

28.4. Луч естественного света отражается от плоского стеклянного дна сосуда, наполненного водой. Каков должен быть угол падения луча, чтобы отраженный луч был максимально поляризован? Показатель преломления стекла 1,52, воды — 1,33.

28.5. Луч света, падая на поверхность раствора, частично отражается, частично преломляется. Определить показатель преломления раствора, если отраженный луч полностью поляризуется при угле преломления 35° .

28.6. Определить коэффициент отражения стекла, показатель преломления которого $n = 1,5$, при условии, что естественный луч падает на его поверхность под углом Брюстера.

28.7. На пути пучка естественного света поместили последовательно два одинаковых поляризационных приспособления. Оказалось, что при параллельных плоскостях поляризации эта система пропускает в 10 раз больше света, чем при скрещенных.

Определить степень поляризации, которую создает каждое приспособление в отдельности и вся система при параллельных плоскостях поляризации.

28.8. Анализатор в 2 раза ослабляет интенсивность падающего на него поляризованного света. Каков угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора? Потерями света на отражение пренебречь.

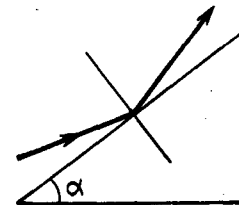


Рис. 28.1

28.9. Луч естественного света последовательно проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых 60° . Какая доля начального потока выйдет из анализатора?

28.10. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ?

28.11. Во сколько раз ослабевает естественный свет, проходя через два николя, главные плоскости которых составляют между собой угол 63° , если в каждом из николей теряется 10% падающего света?

28.12. Частично поляризованный свет рассматривается через николь. При повороте николя на 45° относительно положения, соответствующего максимальной интенсивности выходящего пучка, интенсивность света уменьшается в 1,5 раза. Определить отношение интенсивностей в естественной и поляризованной части падающего пучка.

28.13. На пути плоскополяризованного луча поместили пластинку кварца, вырезанную параллельно оптической оси кристалла. Какой толщины должна быть пластинка, чтобы образующаяся разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами составила $1/4$ длины волны желтого света ($\lambda = 589$ нм)? Максимальный показатель преломления необыкновенного луча данной длины волны 1,553, а обыкновенного — 1,543.

28.14. Плоскопараллельная пластинка в $1/4$ волны вырезана из кварца и имеет толщину 16 мкм. На нее падает монохроматический свет с длиной волны 589 нм. Определить показатель преломления необыкновенного луча, если показатель преломления обыкновенного 1,544.

28.15. Показатели преломления кварца для света с длиной волны 0,4829 мкм равны $n_1 = 1,553$, $n_0 = 1,542$. Какую толщину должна иметь пластинка в $1/4$ волны, вырезанная из кварца вдоль его оптической оси?

28.16. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света длиной волны 490 нм равен 150° . Постоянная вращения в кварце для этой длины волны $26,3^\circ/\text{мм}$.

28.17. Между двумя параллельными николями помещают кварцевую пластинку толщиной 1 мм, вырезанную параллельно оптической оси. При этом плоскость поляризации монохроматического света, падающего на поляризатор, повернулась на угол 20° . При какой минимальной толщине пластинки свет не пройдет через анализатор?

28.18. Раствор сахара, налитый в трубку длиной 18 см и помещенный между поляризаторами, поворачивает плоскость колебаний желтых лучей натриевого пламени на 30° . Какова масса сахара, находящегося в растворе объемом 1 м^3 , если удельное вращение сахара для желтых лучей натрия $66,7 \cdot 10^{-20}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг})$?

28.19. Концентрация раствора сахара, налитого в стеклянную

трубку, равна $0,3 \text{ г/см}^3$. Этот раствор вращает плоскость поляризации монохроматического света на 25° . Определить концентрацию раствора в другой такой же трубке, если он вращает плоскость поляризации на 20° .

28.20. Между скрещенными николями поляриметра поместили трубку с сахарным раствором. Поле зрения при этом стало максимально светлым. Определить длину трубки, если концентрация сахара 270 кг/м^3 , а его удельное вращение $66,5^\circ/\text{дм}$ при концентрации 100 кг/м^3 .

§ 29. ДИСПЕРСИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА. РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Интенсивность света, вышедшего из слоя вещества толщиной l после поглощения (закон Бугера):

$$I = I_0 e^{-kl},$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на поглощающий слой, k — коэффициент поглощения.

Для поглощения света в растворах выполняется закон Бугера — Ламберта:

$$I = I_0 e^{-k_1 Cl},$$

где k_1 — коэффициент поглощения на единицу концентрации вещества, C — концентрация растворенного вещества.

Оптическая плотность раствора:

$$D = \lg \left(\frac{1}{\tau} \right) = \lg \left(\frac{I_0}{I_l} \right).$$

Уменьшение интенсивности света вследствие рассеяния:

$$I_l = I_0 e^{-k'l},$$

где k' — коэффициент рассеяния. Совместное действие поглощения и рассеяния приводит к изменению интенсивности по закону:

$$I_l = I_0 e^{-\mu l},$$

где $\mu = k + k'$.

Интенсивность света, рассеянного веществом, зависит от длины волны (закон Рэлея):

$$I = \mu \frac{1}{\lambda^4},$$

где μ — постоянная рассеяния, λ — длина волны падающего света.

В излучении Вавилова — Черенкова угол между направлениями распространения излучения и вектором скорости частицы:

$$\cos \Theta = \frac{c}{nv},$$

где v — скорость заряженной частицы, n — показатель преломления среды, c — скорость света в вакууме.

29.1. Определить дисперсию вещества, фазовую и групповую скорости, если известно, что показатель преломления прозрачных веществ для небольших интервалов длин волн зависит от длины волны следующим образом:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}.$$

29.2. Определить групповую скорость света в сероуглероде. Показатель преломления сероуглерода для длины волны $\lambda = 0,527$ мкм составляет $n = 1,64$, а $\frac{dn}{d\lambda} = -0,218$ мкм⁻¹.

29.3. Показатель преломления воды при $\lambda_1 = 441$ нм равен $n_1 = 1,341$, а при $\lambda_2 = 589$ нм — $n_2 = 1,334$. Определить средние значения фазовой и групповой скоростей света в воде для синей области спектра (средней между λ_1 и λ_2).

29.4. Прозрачная пластинка пропускает половину падающего на нее светового потока. Определить коэффициент поглощения, если толщина пластинки $l = 4,2$ см. Рассеянием пренебречь. Считать, что 10% падающего потока отражается от поверхности пластинки.

29.5. Толщина стекла в теплице 2 мм. Коэффициент поглощения стекла для инфракрасной области спектра $0,62$ см⁻¹. Какая доля энергии достигает растений?

29.6. Пластинка толщиной $d_1 = 3,8$ мм пропускает $D_1 = 0,84$ падающего на нее светового потока. Вторая пластинка из того же вещества толщиной $d_2 = 9,0$ мм пропускает $D_2 = 0,70$ того же светового потока. Найти коэффициент поглощения этого вещества. Свет падает нормально.

29.7. Коэффициент поглощения воды для излучения с длиной волны $0,77$ мкм равен $0,0024$ мм⁻¹. На какой глубине монохроматический пучок лучей будет ослаблен в 2,7 раза? На сколько надо увеличить яркость падающего пучка, если нужно изменить толщину слоя воды с 1 до 5 см, без уменьшения яркости излучения, выходящего из водяного фильтра?

29.8. При прохождении через пластинку свет длиной волны λ_1 ослабляется в результате поглощения в N_1 раз, а свет длиной волны λ_2 — в N_2 раз. Определить коэффициент поглощения для света с длиной волны λ_2 , если коэффициент поглощения для λ_1 равен k_1 .

29.9. В 4%-ном растворе вещества в прозрачном растворителе интенсивность света на глубине $l_1 = 20$ мм ослабляется в 2 раза. Во сколько раз ослабляется интенсивность света на глубине $l_2 = 30$ мм в 8%-ном растворе того же вещества?

29.10. Какова концентрация исследуемого раствора, если одинаковая освещенность фотометрических полей была получена у эталонного 3%-ного раствора при толщине 8 мм, а у исследуемого при толщине 24 мм?

29.11. При прохождении света через слой раствора поглощается $1/3$ первоначальной световой энергии. Определить коэффициент пропускания.

29.12. Чему равна оптическая плотность раствора, если его коэффициент пропускания $\tau = 0,3$?

29.13. При прохождении монохроматического света через слой вещества толщиной $l = 15$ см его интенсивность убывает в 4 раза. Определить коэффициент рассеяния, если коэффициент поглощения $0,025$ см⁻¹.

29.14. Во сколько раз интенсивность молекулярного рассеяния синего света ($\lambda_1 = 460$ нм) превосходит интенсивность рассеяния красного света ($\lambda_2 = 650$ нм)?

29.15. Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы в веществе с показателем преломления $n = 1,60$ возникло излучение Вавилова — Черенкова?

29.16. Свечение Вавилова — Черенкова наблюдается в бензоле. Определить скорость электрона и скорость света в бензоле, если угол между направлением свечения и направлением скорости электрона $38^\circ 30'$. Показатель преломления бензола 1,50.

§ 30. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИКЕ

Эффект Доплера в релятивистском случае:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \Theta},$$

где ν — частота электромагнитного излучения, воспринимаемая наблюдателем, ν_0 — собственная частота излучения, испускаемо-

го неподвижным источником $\beta = \frac{v}{c}$, v — скорость источника отно-

сительно наблюдателя, c — скорость электромагнитного излучения в вакууме, Θ — угол между направлением скорости \vec{v} и направлением наблюдения в системе, связанной с наблюдателем.

При удалении источника от наблюдателя ($\Theta = 0$):

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}.$$

При сближении источника и наблюдателя ($\Theta = \pi$):

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}.$$

30.1. В опыте Физо по определению скорости света расстояние от зубчатого колеса до зеркала составляло 10 км. Последовательные исчезновения света наблюдались при скоростях вращения колеса 52 и 72,8 об/с. Определить скорость света.

30.2. В опыте, аналогичном тому, посредством которого Физо определял коэффициент увлечения мирового эфира водой, суммарный путь света в воде $2l = 2,00$ м. Длина волны света $\lambda = 600$ нм. Определить число полос ΔN , на которое смещается интерференционная картина при приведении воды в движение со скоростью $u = 6,00$ м/с. Показатель преломления воды $n = 1,33$.

30.3. Какова должна быть максимальная скорость источника излучения, чтобы при расчете эффекта Доплера можно было воспользоваться приближенной формулой $\nu = \nu_0(1 - \frac{v}{c})$? Погрешность в определении частоты должна быть не более 1%.

30.4. Туманность удаляется от Солнечной системы со скоростью $v = \frac{1}{3}c$. На какое расстояние сместится к красному концу ее спектра линия водорода с длиной волны $\lambda = 434$ нм?

30.5. Источник монохроматического излучения движется со скоростью $v = 0,1$ с по направлению к наблюдателю. Спектральный прибор наблюдателя регистрирует излучение этого источника $\lambda = 0,542$ мкм. Какова длина волны, излучаемой источником?

30.6. Изучается спектр звезды, лежащей в плоскости земной орбиты. На сколько будут отличаться в спектре звезды два измерения длины волны линии $\lambda = 0,4227$ мкм, если первое сделано при движении Земли по направлению к звезде, а второе — через полгода, когда направление движения Земли на орбите изменится на противоположное?

30.7. Найти относительное изменение длины волны источника $(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})$, если он движется со скоростью v в среде с показателем преломления n .

30.8. Для экспериментальной проверки принципа Доплера А. Белопольский применил метод отражения света от быстро вращающихся в противоположных направлениях зеркал. Определить изменение $\Delta\lambda$ длины волны света, падающего на зеркала нормально, если монохроматический свет с длиной волны λ испытывает N отражений, прежде чем попадает в спектрограф. Линейная скорость вращающихся навстречу друг другу зеркал v .

30.9. Длина волны линии H_α в спектре Солнца равна $\lambda = 656$ нм. Измерение этой длины волны, приходящей от диаметрально противоположных краев солнечного диска, показало различие на $\Delta\lambda = 0,088$ нм. Найти период T обращения Солнца вокруг собственной оси.

30.10. Приемник радиолокационной установки определяет скорость приближающегося объекта по регистрируемой локатором частоте биений между сигналом, посылаемым локатором, и частотой сигнала, отраженного от движущегося объекта. Определить скорость приближающегося объекта, если локатор работает на длине волны $\lambda = 0,5$ м, а частота биений $\Delta\nu = 4$ кГц.

§ 31. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

Энергия фотона:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка, ν — частота света.

Релятивистские масса и импульс фотона:

$$m = \frac{E}{c^2} \text{ и } p = \frac{h\nu}{c}.$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где A — работа выхода электрона.

Давление света при нормальном падении:

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho),$$

где ρ — коэффициент отражения света, I — поверхностная плотность потока.

Коротковолновая граница λ_0 сплошного рентгеновского спектра, обусловленного торможением электронов:

$$h\nu_0 = eU,$$

где U — разность потенциалов, приложенная к электродам рентгеновской трубки, ν_0 — максимальная частота, при которой еще возможно тормозное рентгеновское излучение.

Эффект Комптона:

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где $\lambda_c = h/(mc)$ — комптоновская длина волны, φ — угол рассеяния.

Интенсивность пучка рентгеновских лучей при прохождении их через поглощающее вещество:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 — интенсивность рентгеновских лучей, падающих на поверхность вещества, $\mu = \mu_m$ — линейный коэффициент поглоще-

ния, ρ — плотность вещества, μ_m — массовый коэффициент поглощения.

Энергетическая светимость абсолютно черного тела (закон Стефана — Больцмана):

$$R_s = \sigma T^4,$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, T — термодинамическая температура абсолютно черного тела.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где b — постоянная Вина.

Формула Планка:

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1},$$

где $\hbar = h/2\pi$, $\omega = 2\pi\nu$.

Максимальная излучательная способность абсолютно черного тела:

$$\Phi_{\lambda_{\max}} = CT^5,$$

где $C = 1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵).

Энергия, импульс и масса фотона

31.1. Найти энергию фотона: 1) красного ($\lambda = 0,7$ мкм), 2) зеленого ($\lambda = 0,55$ мкм), 3) фиолетового ($\lambda = 0,4$ мкм), 4) инфракрасного ($\lambda = 10$ мкм) излучений.

31.2. Во сколько раз энергия фотона ($\lambda = 550$ нм) больше средней кинетической энергии поступательного движения молекулы кислорода при комнатной температуре (17°C)?

31.3. Принадлежит ли к составу видимого света излучение, фотоны которого обладают энергией $6 \cdot 10^{-19}$ Дж?

31.4. Определить длину волны, если соответствующий ей фотон обладает энергией 10^{-19} Дж. К какой части спектра принадлежит эта длина волны?

31.5. При помощи индукционного ускорителя электронов (бетатрона) можно получить фотоны γ -лучей с энергией 100 МэВ. Какова длина волны этих лучей?

31.6. Определить частоту ν света и сравнить энергию фотонов, соответствующих длинам волн: 1) $\lambda = 280$ нм и 2) $\lambda = 254$ нм.

31.7. Определить релятивистскую массу фотона: 1) лучистой энергии для $\lambda = 0,40$ мкм и $\lambda = 2$ нм, 2) γ -лучей ($\lambda = 2,3$ пм).

31.8. Какой длиной волны должен обладать фотон, чтобы его релятивистская масса была равна массе покоя электрона?

31.9. Какая длина волны соответствует фотону, релятивистская масса которого $1,66 \cdot 10^{-30}$ кг?

31.10. Энергия фотона 1 МэВ. Определить импульс фотона.

31.11. Определить энергию, релятивистские массу и импульс

фотона рентгеновских лучей с длинами волн 100 и 2 пм. Сравнить его релятивистскую массу с массой электрона.

31.12. Считая, что мощность лампы рассеивается во все стороны в виде излучения и что средняя длина волны 0,5 мкм, найти число фотонов, которые падают за 1 с на поверхность площадью 1 см², расположенную перпендикулярно лучам на расстоянии 50 см от лампы. Мощность лампы 25 Вт.

31.13. Точечный источник света потребляет мощность $N = 100$ Вт и равномерно испускает свет во все стороны. Длина волны испускаемого при этом света $\lambda = 589$ нм. КПД источника 0,1%. Вычислить число фотонов, испускаемых источником за 1 с.

31.14. Флуктуации слабых световых потоков были впервые обнаружены визуальным методом и изучены С. И. Вавиловым. Число фотонов в световом потоке изменяется от 90 до 120 за 1 с (частота одинакова). Определить при этом изменение мощности световых потоков.

31.15. При какой температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул одноатомного газа равна энергии фотонов рентгеновских лучей ($\lambda = 0,1$ нм)?

Фотоэффект

31.16. Один из результатов опыта А. Г. Столетова был сформулирован так: «Разряжающим действием обладают лучи самой высокой преломляемости, длина которых менее 295 нм». На основании этого найти работу выхода электронов с поверхности молибдена.

31.17. Будет ли иметь место фотоэффект у лития, если он освещается монохроматическим светом с длиной волны 589 нм?

31.18. Определить красную границу фотоэффекта для платины, серебра, вольфрама, тантала и цезия.

31.19. Красная граница фотоэффекта для железа, ртути, лития, натрия, калия определяется соответственно длинами волн 262, 274, 517, 540, 620 нм. Найти работу выхода электронов из металлов и выразить ее в электрон-вольтах.

31.20. На поверхность металла падают γ -лучи ($\lambda = 1,2$ пм). По сравнению с энергией γ -фотонов работа выхода настолько мала, что ею можно пренебречь. Какова скорость вылета электронов, если вычислять ее по уравнению Эйнштейна для фотоэффекта? Чем объяснить полученный результат?

31.21. Какова максимальная скорость электронов, вылетающих с поверхности молибдена при освещении его лучами с длиной волны 200 нм?

31.22. Какой длины электромагнитную волну следует направить на поверхность цинка, чтобы максимальная скорость электронов, вылетевшего из металла, была 0,8 Мм/с?

31.23. На поверхность никеля падает монохроматический свет ($\lambda = 200$ нм). Красная граница фотоэффекта для никеля 248 нм. Определить энергию падающих фотонов, работу выхода электро-

нов, максимальную кинетическую энергию электронов и их скорость.

31.24. Красная граница фотоэффекта для платины лежит около 198 нм. Если платину прокалить при высокой температуре, то красная граница фотоэффекта станет равной 220 нм. На сколько электрон-вольт прокаливанию уменьшает работу выхода электронов?

31.25. На незаряженную металлическую пластинку, присоединенную к электрометру, направили пучок рентгеновских лучей. Когда пластинка зарядилась до потенциала $U = 124$ В, испускание электронов прекратилось. Определить длину волны рентгеновских лучей. Работой выхода электронов можно пренебречь.

31.26. Красная граница фотоэффекта рубидия 810 нм. Какое задерживающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы ни одному из электронов, испускаемых рубидием под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 100 нм, не удалось преодолеть задерживающее поле?

31.27. Изолированная металлическая пластинка освещается светом с длиной волны 450 нм. Работа выхода электронов из металла 2 эВ. До какого потенциала зарядится пластинка при непрерывном действии света?

31.28. Фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности некоторого металла светом с частотой $2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, полностью задерживаются потенциалом 6,6 В, а вырывающиеся светом с частотой $4,6 \cdot 10^{15}$ Гц — потенциалом 16,5 В. Найти постоянную Планка (этот метод измерения постоянной Планка был предложен П. И. Лукирским).

Давление света

31.29. В классических опытах П. Н. Лебедева по экспериментальному определению светового давления поток лучистой энергии направляется на крылышки весьма чувствительных крутильных весов. Вычислить давление, которое испытывали зачерненные и зеркальные крылышки измерительной установки, если поток падающей световой энергии равен $1,05$ кДж/(м²·с).

31.30. Плотность потока световой энергии на поверхности 7 кВт/м². Найти световое давление для случаев, когда поверхность: 1) полностью отражает все лучи; 2) полностью поглощает все падающие на нее лучи.

31.31. Давление излучения на плоское зеркало $0,2$ Па. Определить интенсивность света, падающего на поверхность зеркала с коэффициентом отражения $0,6$. Считать, что световой поток нормально падает на поверхность зеркала.

31.32. Русский астроном Ф. А. Бредихин объяснил форму кометных хвостов давлением солнечных лучей. Найти: 1) световое давление солнечных лучей на абсолютно черное тело, помещенное на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля; 2) какой массы должна быть частица в кометном хвосте, помещенная на этом расстоянии, чтобы сила светового давления

на нее уравновешивалась силой притяжения частицы Солнцем. Площадь частицы, отражающей все падающие на нее лучи, считать равной $0,5 \cdot 10^{-8}$ см², а солнечную постоянную, т. е. лучистую энергию, которую посылает Солнце каждую секунду через поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно солнечным лучам и находящуюся вблизи Земли за пределами ее атмосферы, $C = 1,4$ кВт/м².

31.33. Световой поток мощностью $N = 9$ Вт нормально падает на поверхность площадью $S = 10$ см², коэффициент отражения которой $\rho = 0,8$. Какое давление испытывает при этом данная поверхность?

31.34. На поверхность площадью $S = 10$ см² падает пучок фотонов интенсивностью $n = 10^{18}$ с⁻¹. Длина волны падающего света $\lambda = 500$ нм. Определить световое давление на поверхность, если коэффициент отражения поверхности $\rho = 0,7$.

31.35. Электрическая лампа рассчитана на мощность $N = 45$ Вт. Вычислить давление лучистой энергии на зеркальную поверхность с коэффициентом отражения $\rho = 1$, расположенную нормально к падающим лучам на расстоянии $r = 1$ м от лампы.

31.36. Небольшая электрическая дуга, расходующая на излучение мощность $N = 600$ Вт, расположена в центре кривизны вогнутого зеркала поверхностью $S = 300$ см². Допуская, что дуга излучает равномерно по всем направлениям, определить силу давления света на зеркало. Радиус кривизны зеркала $r = 10$ см; зеркало считать идеально отражающим.

31.37. Колба электрической лампы представляет собой сферу радиусом $r = 3$ см. Часть стенки колбы изнутри посеребрена. Лампа потребляет мощность $N = 60$ Вт, 80% которой затрачивается на излучение. Определить, во сколько раз давление газа в колбе ($p_g = 13,3$ кПа) меньше светового давления на посеребренную часть стенки колбы с коэффициентом отражения $\rho = 0,8$.

31.38. Определить диаметр шарообразного спутника, движущегося вокруг Земли, если сила давления солнечного света на спутник $11,2$ мН, коэффициент отражения света от поверхности спутника равен $\rho = 1$, солнечная постоянная $C = 1,4$ кВт/м² (см. задачу 31.32). Поглощением солнечного света в атмосфере пренебречь.

Тормозное рентгеновское излучение

31.39. Определить скорость электрона в рентгеновской трубке, прошедшего разность потенциалов 10 кВ.

31.40. Наименьшая длина волны сплошного спектра рентгеновских лучей, полученного в результате торможения электронов на антикатоде рентгеновской трубки, $\lambda = 0,5$ нм. Какова наибольшая скорость электронов?

31.41. Антикатоде рентгеновской трубки бомбардируется электронами, скорость которых 100 Мм/с. Определить максимальную частоту излучения в сплошном рентгеновском спектре с учетом

зависимости релятивистской массы электрона от скорости его движения.

31.42. Наименьшая длина волны рентгеновских лучей, полученных от трубки, которая работает при напряжении 40 кВ, равна 31 пм. Вычислить по этим данным постоянную Планка.

31.43. Рентгеновская трубка работает при напряжении 30 кВ. Найти наименьшее значение длины волны рентгеновского излучения.

Эффект Комптона. Интенсивность рентгеновских лучей

31.44. Известно, что эффект Комптона наблюдается при рассеянии фотонов на свободных электронах. 1) Какие электроны в веществе можно считать свободными? 2) Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии видимого света?

31.45. В теории эффекта Комптона изменение длины волны при рассеянии оказывается не зависящим от природы рассеивающего вещества. Является ли этот вывод строгим?

31.46. Найти изменение длины волны света при рассеянии его под углом 90° на свободных первоначально покоившихся протонах.

31.47. Вычислить комптоновское смещение и относительное изменение длины волны для видимого света ($\lambda = 500$ нм) и γ -лучей ($\lambda = 5$ пм) при рассеянии на первоначально покоившихся свободных электронах. Угол рассеяния 90° .

31.48. Фотон при столкновении с релятивистским электроном рассеялся под углом 60° , а электрон потерял почти всю кинетическую энергию. Найти изменение длины волны фотона при рассеянии, если до столкновения он обладал энергией 0,51 МэВ.

31.49. Определить максимальные комптоновские изменения длины волны при рассеянии фотонов на свободных первоначально покоившихся электронах и ядрах атомов водорода.

31.50. Рентгеновское излучение с длиной волны 56,3 пм рассеивается плиткой графита. Определить длину волны лучей, рассеянных под углом 120° к первоначальному направлению рентгеновских лучей.

31.51. γ -лучи с длиной волны 2,7 пм испытывают комптоновское рассеяние. Во сколько раз длина волны излучения, рассеянного под углом 180° к первоначальному направлению, больше длины волны падающего излучения?

31.52. Фотон жестких рентгеновских лучей ($\lambda = 24$ пм) при соударении со свободным электроном передал ему 9% своей энергии. Определить длину волны рассеянного рентгеновского излучения.

31.53. Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии 2,4 пм. Вычислить угол рассеяния и энергию, переданную при этом электронам отдачи, если длина волны рентгеновских лучей до взаимодействия 10,0 пм.

31.54. Какую энергию приобретает комптоновский электрон

отдачи при рассеянии фотона под углами 60° , 90° и 180° , если длина волны падающего фотона 3 пм?

31.55. Фотон с энергией $E = 0,75$ МэВ рассеялся на свободном электроном под углом $\varphi = 60^\circ$. Найти энергию рассеянного фотона E' , кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. Кинетической энергией электрона до соударения пренебречь.

31.56. Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 1,24$ пм проходят слой железа толщиной $d = 1,5$ см. Во сколько раз уменьшится интенсивность рентгеновских лучей? Массовый коэффициент поглощения железа для этой длины волны $\mu_m = 5,6 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$.

31.57. Найти для свинца толщину слоя, уменьшающего вдвое интенсивность падающих рентгеновских лучей некоторой длины волны. Массовый коэффициент поглощения свинца для этой длины волны $\mu_m = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$.

Тепловое излучение

31.58. Какова температура печи, если известно, что из отверстия в ней площадью 4 см^2 излучается за 1 с энергия 22,7 Дж? Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

31.59. Земля вследствие излучения в среднем ежеминутно теряет с поверхности площадью 1 м^2 энергию 5,4 кДж. При какой температуре абсолютно черное тело излучало бы такую же энергию?

31.60. Вычислить энергию, излучаемую с поверхности Солнца площадью 1 м^2 за 1 мин, приняв температуру его поверхности равной 5800 К. Считать, что Солнце излучает как абсолютно черное тело.

31.61. Найти мощность, излучаемую абсолютно черным шаром радиусом 10 см, который находится в комнате при температуре 20°C .

31.62. Температура абсолютно черного тела изменяется от 727 до 1727°C . Во сколько раз изменится при этом энергия, излучаемая телом?

31.63. Температура абсолютно черного тела 127°C . После повышения температуры суммарная мощность излучения увеличилась в 3 раза. На сколько повысилась при этом температура?

31.64. Котел с водой при температуре 97°C излучает энергию на руку наблюдателя, на поверхности которой температура 27°C . Во сколько раз больше энергии получит тело при температуре 0°C такой же поверхности за одно и то же время на том же расстоянии? Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

31.65. Какую энергию излучает в течение суток каменное оштукатуренное здание с поверхностью общей площадью 1000 м^2 , если температура излучающей поверхности 0°C ? Отношение энергетических светимостей каменного оштукатуренного здания и абсолютно черного тела для данной температуры $k = 0,8$.

31.66. Стальная болванка, температура которой 727°C , излучает за 1 с 4 Дж энергии с поверхности площадью 1 см^2 . Определить отношение энергетических светимостей стальной болванки и абсолютно черного тела при данной температуре, считая, что оно одинаково для всех волн.

31.67. Пренебрегая потерями на теплопроводность, найти мощность электрического тока, необходимую для накаливания нити диаметром 1 мм и длиной 20 см до температуры 2500 К . Считать, что нить излучает как абсолютно черное тело и по установлении равновесия все выделяющееся в нити количество теплоты теряется на излучение.

31.68. Площадь поверхности вольфрамовой нити накала вакуумной лампы мощностью 25 Вт $0,403\text{ см}^2$, а ее температура накала 2177°C . Во сколько раз меньше энергии излучает лампа, чем абсолютно черное тело с поверхности такой же площади при той же температуре? Считать, что по установлении равновесия все выделяющееся в нити количество теплоты теряется на излучение.

31.69. Солнечная постоянная $C = 1,4\text{ кВт/м}^2$ (см. задачу 31.32). Считая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело, определить температуру его излучающей поверхности.

31.70. Абсолютно черная пластинка, находящаяся вблизи Земли за пределами ее атмосферы, освещается лучами, которые падают на нее перпендикулярно. Определить установившуюся температуру пластинки, если солнечная постоянная $C = 1,4\text{ кВт/м}^2$ (см. задачу 31.32).

31.71. Железный шар диаметром 10 см, нагретый до температуры 1227°C , остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 К ? При расчете принять, что отношение энергетических светимостей железа и абсолютно черного тела 0,5. Теплопроводностью воздуха пренебречь.

31.72. При сжигании в вакууме тонкой вольфрамовой нити сильным электрическим током получается на мгновение весьма высокая температура. Длина волны, при которой излучательная способность этой нити максимальна, $145,0\text{ нм}$. Определить температуру нити накала в момент ее сжигания.

31.73. В какой области спектра лежит длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности Солнца, если температура его поверхности 5800 К ?

31.74. Температура поверхности звезды $12\,000\text{ К}$. Можно ли определить эту температуру по закону смещения Вина, если земная атмосфера поглощает все лучи с длиной волны короче 290 нм ?

31.75. Сколько энергии излучает абсолютно черное тело за 1 с со светящейся поверхности площадью 1 см^2 , если максимум излучательной способности приходится на длину волны $725,0\text{ нм}$?

31.76. Из отверстия в печи площадью $10,0\text{ см}^2$ излучается $250,0\text{ кДж}$ энергии за 1 мин. В какой области спектра лежит

длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности?

31.77. В излучении абсолютно черного тела максимум излучательной способности падает на длину волны 680 нм . Сколько энергии излучает это тело площадью 1 см^2 за 1 с и какова потеря его массы за 1 с вследствие излучения?

31.78. Длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности абсолютно черного тела, $720,0\text{ нм}$, площадь излучающей поверхности — $5,0\text{ см}^2$. Определить мощность излучения.

31.79. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум излучательной способности переместится от $700,0$ до $600,0\text{ нм}$?

31.80. При работе электрической лампы накаливания вольфрамовый волосок нагрелся, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от $1,4$ до $1,1\text{ мкм}$. Во сколько раз увеличилась при этом максимальная излучательная способность, если его принять за абсолютно черное тело? На сколько изменилась при этом температура волоска?

31.81. Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1327 до 1727°C . На сколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, и во сколько раз увеличилась максимальная излучательная способность?

31.82. Пользуясь формулой Планка, получить закон Стефана — Больцмана и найти значение постоянной в законе смещения Вина.

§ 32. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Длина волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Принцип неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2, \Delta E \Delta t \geq \hbar/2,$$

где Δp_x — неопределенность проекции импульса частицы на ось x , Δx — неопределенность ее координаты, ΔE — неопределенность энергии данного квантового состояния, Δt — время пребывания системы в этом состоянии.

Уравнение Шрёдингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = i\hbar \frac{d\psi}{dt},$$

где m — масса частицы, i — мнимая единица, $\psi(x, y, z, t)$ — полная волновая функция, U — потенциальная энергия частицы;

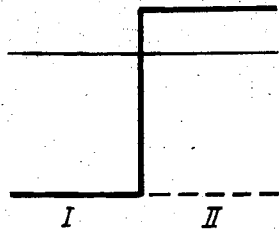


Рис. 32.1

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}.$$

Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0,$$

где E — полная энергия частицы.

Волновые функции удовлетворяют условию нормировки:

$$\int \psi^* \psi dV = 1.$$

Коэффициент отражения волн де Бройля от низкого ($U < E$) потенциального барьера бесконечной ширины (рис. 32.1):

$$R = (K_1 - K_2)^2 / (K_1 + K_2)^2,$$

где K_1, K_2 — значения волнового числа в областях I и II (волновое число $K = 2\pi/\lambda$).

Коэффициент прозрачности потенциального барьера $U(x)$:

$$D \approx \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx \right],$$

где x_1 и x_2 — координаты точек, между которыми $U > E$.

Схема возникновения рентгеновских спектров (рис. 32.2).

Закон Мозли для линий K_α :

$$\omega = \frac{3}{4} R^* (Z - \sigma)^2,$$

где $R^* = 2\pi c R$, R — постоянная Ридберга, Z — порядковый номер элемента, из которого сделан антикатод, σ — поправка, равная для легких элементов единице.

Волны де Бройля

32.1. Найти длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью: 1) 20 км/с и 2) 0,8 км/с.

32.2. Скорость так называемых тепловых нейтронов, средняя

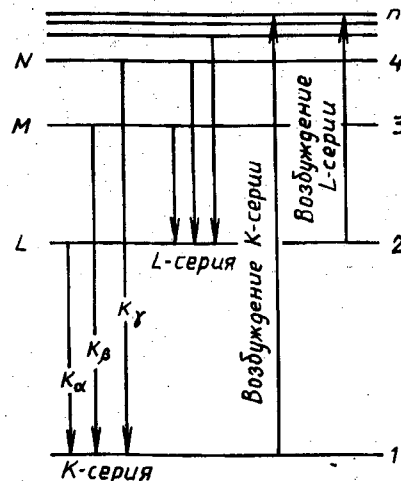


Рис. 32.2

кинетическая энергия которых близка к средней энергии атомов газа при комнатной температуре, 2,5 км/с. Найти длину волны де Бройля для таких нейтронов.

32.3. В телевизионной трубке проекционного типа электроны разгоняются до скорости 10^8 м/с. Определить длину волны катодных лучей без учета и с учетом зависимости массы от скорости.

32.4. Вычислить длину волны де Бройля для протона с кинетической энергией 100 эВ.

32.5. Найти длину волны де Бройля для α -частицы, нейтрона и молекулы азота, движущихся со средней квадратичной скоростью при температуре 25°C.

32.6. Вычислить кинетическую энергию электрона, молекулы кислорода и частицы, радиус которой 0,1 мкм и плотность 2000 кг/м³, если каждой из этих частиц соответствует длина волны де Бройля 100 пм.

32.7. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов 510 кВ. Определить длину волны де Бройля, учитывая релятивистские эффекты.

32.8. При торможении электронов на антикатоде рентгеновской трубки возникает тормозной рентгеновский спектр с коротковолновой границей $\lambda_0 = 10^{-10}$ м. Найти длину волны де Бройля для электрона, считая его релятивистским.

32.9. Какой кинетической энергией обладает протон с длиной волны де Бройля, равной граничной длине волны рентгеновских лучей, возникающих в трубке при разности потенциалов $U = 40$ эВ?

32.10. На грань кристалла никеля падает под углом $\varphi = 64^\circ$ к поверхности грани параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Принять расстояние между соответствующими плоскостями, параллельными грани кристалла, $d = 200$ пм. Пользуясь уравнением Вульфа — Брегга, найти скорость электронов, если они испытывают интерференционное отражение 1-го порядка.

32.11. Электронный пучок с постоянной скоростью падает на поверхность фторида лития LiF. Найти ускоряющую разность потенциалов, при которой наблюдается второй дифракционный максимум под углом $\varphi = 1^\circ 30'$. Считать расстояние между соответствующими атомными плоскостями $d = 380$ пм.

Принцип неопределенности Гейзенберга

32.12. Неопределенность скорости электронов, движущихся вдоль оси абсцисс, составляет $\Delta v = 10^2$ м/с. Какова при этом неопределенность координаты x , определяющей местоположение электрона?

32.13. Молекулы водорода участвуют в тепловом движении при $T = 300$ К. Найти неопределенность координаты Δx молекул водорода.

32.14. Какова неопределенность скорости электрона в атоме водорода? Во сколько раз найденное значение скорости больше скорости электрона на первой боровской орбите? Считать, что наибольшая ошибка в определении координаты электрона будет того же порядка, что и размер атома водорода ($d \approx 10^{-10}$ м).

32.15. Пользуясь условиями задачи 32.14, оценить длину волны де Бройля электрона в атоме водорода.

32.16. Длительность возбужденного состояния атома водорода соответствует примерно $\Delta t = 10^{-7}$ с. Какова неопределенность энергий в этом состоянии?

32.17. Наименьшая неточность, с которой можно найти координату электрона в атоме водорода, порядка 10^{-10} м. Найти неопределенность средней кинетической энергии электрона в невозбужденном атоме водорода.

Уравнение Шрёдингера

32.18. Найти общее решение одномерного временного уравнения Шрёдингера для свободной частицы.

32.19. Показать, что решение уравнения Шрёдингера для электрона, находящегося в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, приводит к дискретным значениям энергии.

32.20. Электрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной $a = 10^{-9}$ м с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти его наименьшее значение энергии.

32.21. Нейтрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной $a = 10^{-14}$ м с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти наименьшую разность двух соседних энергетических уровней нейтрона.

32.22. Найти собственные функции и собственные значения оператора энергии для частицы с массой m в поле (рис. 32.3):

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x \leq 0, x \geq a, \\ 0, & 0 < x < a. \end{cases}$$

32.23. Микрочастица массой m находится в потенциальной яме (рис. 32.4). Найти волновые функции и спектр собственных значений энергии частиц в области энергий $E < U_0$. Считать, что при $x > a$ $U(x) = U_0$, при $0 \leq x \leq a$ $U(x) = 0$, а при $x = 0$ $U(x) \rightarrow \infty$.

32.24. Микрочастица находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме (рис. 32.5). Найти уравнение, определяющее возможные значения энергии данной частицы в случае, когда ее полная энергия $E > U_0$.

32.25. Электроны, обладающие энергией $E = 16,0$ эВ, на своем пути встречают прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 4,0$ эВ (рис. 32.6). Найти коэффициент отражения R и коэффициент пропускания D волн де Бройля для данного барьера.

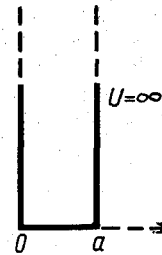


Рис. 32.3

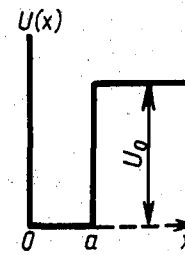


Рис. 32.4

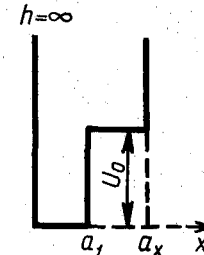


Рис. 32.5



Рис. 32.6

Закон Мозли

32.26. Найти длину волны K_α -линии алюминия.

32.27. Если известно, что длина волны K_α -линии железа равна 193 пм, подсчитать длину волны K_α -линии меди.

32.28. Сколько элементов содержится в ряду между теми, у которых длины волн K_α -линий 193 пм и 154 пм?

32.29. Определить интервал длин волн между K_α -линией и коротковолновой границей сплошного рентгеновского спектра с медным антикатодом при напряжении 20 кВ.

32.30. Принимая для молибдена поправку $\sigma = 1$, найти, при каком наименьшем напряжении на рентгеновской трубке с молибденовым катодом проявятся линии серии K_α .

§ 33. МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА — БОРА

Момент импульса электрона, движущегося вокруг ядра, кратен \hbar :

$$L = m v_k r_k = k \hbar,$$

где m — масса электрона, v_k — его скорость на k -й орбите, r_k — радиус этой орбиты, $k = 1, 2, 3, \dots$ — целое положительное число (главное квантовое число).

Энергия светового фотона равна разности энергии тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

$$\hbar \omega = E_n - E_k,$$

где E_n — энергия электрона на орбите n , E_k — его энергия на орбите k , ω — частота излучения.

Если $E_n > E_k$, фотон излучается, при $E_n < E_k$ наблюдается поглощение фотона с частотой ω .

Дозволенные значения внутренней энергии водородоподобного атома:

$$E_k = - \frac{m e^4}{2 \hbar^2} \cdot \frac{Z^2}{k^2}.$$

Обобщенная формула Бальмера (рис. 33.1):

$$\omega = R^* Z^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), R^* = \frac{me^4}{2\hbar^3},$$

где ω — частота перехода между энергетическими уровнями с квантовыми числами k и n .

33.1. Пользуясь представлением модели атома Резерфорда — Бора, вывести формулу скорости движения электрона по орбите. Вычислить ее скорость на двух первых электронных круговых орбитах в атоме водорода.

33.2. Электрон движется по второй орбите атома водорода. Найти длину волны де Бройля.

33.3. Стационарная электронная орбита представляет собой устойчивое состояние. Пользуясь условиями квантования, вывести формулу радиуса допустимой электронной орбиты. Найти радиусы двух первых орбит электрона в атоме водорода.

33.4. С помощью условий квантования вывести формулу центростремительного ускорения электрона на орбите. Найти их ускорения на двух первых орбитах в атоме водорода.

33.5. На какой орбите скорость электрона атома водорода равна 734 км/с?

33.6. Определить для первой и второй круговых орбит атома водорода значения силы кулоновского притяжения и напряженность электрического поля.

33.7. Во сколько раз увеличится радиус орбиты электрона у атома водорода, находящегося в основном состоянии, при возбуждении его фотоном энергией 12,09 эВ?

33.8. Атом водорода излучает фотон частотой ν . Найти изменение длины волны фотона, возникающее вследствие отдачи, претерпеваемой атомом при излучении.

33.9. Фотон с частотой ω поглощается покоящимся атомом массой m_0 . Найти скорость атома после поглощения фотона.

33.10. Переход электрона в атоме водорода с n -й на k -ю орбиту ($k=1$) сопровождается излучением фотона с длиной волны $\lambda=102,6$ нм. Найти радиус n -й орбиты.

33.11. Атом водорода переведен из нормального состояния в возбужденное, характеризуемое главным квантовым числом 2. Найти энергию, необходимую для перевода атома водорода в указанное возбужденное состояние.

33.12. Каждой допустимой электронной орбите отвечает определенный энергетический уровень, энергию которого можно представить в виде суммы потенциальной E_p и кинетической E_k энергий электрона. Вывести формулу полной энергии электрона на k -й орбите.

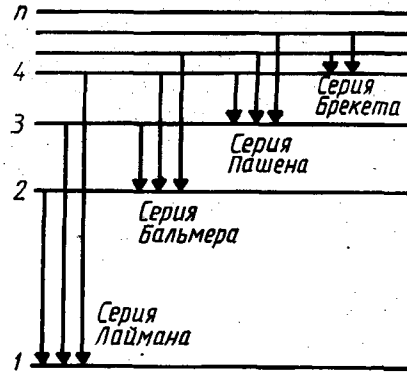


Рис. 33.1

33.13. Несмотря на успех атомной модели Резерфорда — Бора, она обладает рядом недостатков. Кроме того, в ней содержатся некоторые произвольные положения, которые пришлось ввести для объяснения экспериментальных результатов. Согласно де Бройлю, электрону отвечает длина волны $\lambda = h/(mv_k)$. Определить длины волн де Бройля электрона на первой и третьей орбитах в атоме водорода. Показать, что на электронных орбитах атома водорода укладывается целое число волн де Бройля.

33.14. Определить границы серии водородных линий, расположенных в далекой ультрафиолетовой части спектра (серия Лаймана).

33.15. Определить энергию фотона, соответствующего наименьшей длине волны, в ультрафиолетовой серии водорода.

33.16. Найти длины волн первой, второй и третьей линий видимой серии водорода (серия Бальмера).

33.17. Какова длина волны четвертой по порядку спектральной линии в инфракрасной области спектра водорода (серия Пашена)?

33.18. Экспериментально установлено, что вторая спектральная линия водородной серии Бреккета соответствует длине волны 2,63 мкм. На основании этих данных установить приближенное значение постоянной Ридберга.

33.19. Наибольшая длина волны спектральной водородной линии серии Лаймана 121,6 нм. Вычислить наибольшую длину волны в серии Бальмера.

33.20. При переходе электрона водородного атома с одной из возможных орбит на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на 1,892 эВ. Определить длину волны излучения.

33.21. Какую работу нужно совершить, чтобы удалить электрон со второй орбиты атома водорода за пределы притяжения его ядром?

33.22. Атом водорода переведен из нормального состояния в возбужденное, характеризуемое главным квантовым числом 3. Какие спектральные линии могут появиться в спектре водорода при переходе атома из возбужденного состояния в нормальное?

33.23. Какие спектральные линии появятся в видимой области спектра при возбуждении атомов водорода электронами энергией 13,0 эВ?

33.24. Атом водорода освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100,0 нм. Определить, какие спектральные линии появятся в спектре водорода.

§ 34. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Удельная электропроводность металлов:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m},$$

где n — концентрация свободных электронов, e — элементарный заряд, τ — время релаксации, m — масса электрона.

Подвижность носителей тока:

$$b = \frac{v_d}{E} = \frac{e\tau}{m},$$

где v_d — скорость дрейфа носителей тока, E — напряженность электрического поля.

Удельная электропроводность собственных полупроводников:

$$\sigma = en(b_n + b_p) = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT),$$

где n — концентрация носителей заряда (электронов и дырок), b_n и b_p — подвижности электронов и дырок, σ_0 — постоянная величина (в первом приближении), $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$ — ширина запрещенной зоны.

Молярная теплоемкость кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна:

$$C = 3R \left(\frac{\Theta_E}{T} \right)^2 \frac{\exp(\Theta_E/T)}{[\exp(\Theta_E/T) - 1]},$$

где R — молярная газовая постоянная, $\Theta_E = \hbar\omega/k$ — характеристическая температура Эйнштейна, T — термодинамическая температура, k — постоянная Больцмана.

Молярная внутренняя энергия кристалла по Дебаю:

$$U = U_0 + 9N_A \frac{\hbar}{\omega_{\max}^3} \int_0^{\omega_{\max}} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1},$$

где $U_0 = \frac{9}{8}R\Theta_D$ — молярная энергия нулевых колебаний кристалла по Дебаю, $\Theta_D = \hbar\omega_{\max}/k$ — характеристическая температура Дебая.

Молярная теплоемкость кристалла по Дебаю:

$$C = 9R \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{x_{\max}} \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)},$$

где $x = \hbar\omega/(kT)$ — переменная.

Функция Ферми:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-b}{kT}\right) + 1}.$$

Уровень или энергия Ферми в металле при $T=0\text{K}$:

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3},$$

где n — концентрация свободных электронов в металлах.

Средняя энергия свободного электрона при абсолютном нуле:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{5} E_F(0).$$

Теплоемкость электронного газа:

$$C_V = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{k^2 n T}{E_F}.$$

34.1. В медном проводнике площадью $S=0,4\text{ см}^2$ сила тока 1,5 А. Найти среднюю скорость дрейфа электронов, если концентрация носителей заряда $n=8,4 \cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$.

34.2. В серебре объемом 1 м^3 находится приблизительно $5,8 \cdot 10^{28}$ электронов проводимости. Найти среднюю скорость дрейфа электронов при наложении напряженности электрического поля вдоль проводника $E=1\text{ В/см}$.

34.3. Считая, что каждый атом меди в твердом состоянии отдает в зону проводимости один валентный электрон, найти время релаксации электрона. Удельное сопротивление меди $\rho=17,2\text{ нОм}\cdot\text{м}$.

34.4. Концентрация свободных электронов железа $n=8,5 \times 10^{22}\text{ см}^{-3}$ и его удельное сопротивление при температуре 20°C $\rho=9,71 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Найти при той же температуре время релаксации, среднюю длину свободного пробега электронов и их подвижность.

34.5. Найти удельное сопротивление германиевого полупроводника p -типа при плотности дырок $p_p=3 \cdot 10^{20}\text{ м}^{-3}$ и сравнить его с сопротивлением полупроводника n -типа при той же концентрации электронов. Подвижность дырок в германии $b_p=0,18\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, электронов $b_n=0,38\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

34.6. Какова концентрация носителей заряда собственного германия при температуре 27°C , если удельное сопротивление его $0,47\text{ Ом}\cdot\text{м}$, а подвижности электронов $b_n=0,38\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок $b_p=0,18\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$?

34.7. Ширина запрещенной зоны алмаза $\Delta E=6\text{ эВ}$. Найти длинноволновую границу поглощения света алмазом.

34.8. Во сколько раз изменится электропроводность чистого германия при повышении температуры от -23°C до $+27^\circ\text{C}$? Ширина запретной зоны для германия равна $\Delta E=0,74\text{ эВ}$.

34.9. Удельное сопротивление германия при 27°C $\rho=0,47\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Найти концентрацию носителей заряда в германии. Принять для германия подвижности электронов и дырок $b_n=0,38\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $b_p=0,18\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

34.10. Во сколько раз концентрация носителей тока в чистом сплаве InSb при температуре $T_2=400\text{ К}$ больше концентрации при $T_1=300\text{ К}$? Ширина запрещенной зоны для InSb $\Delta E=0,18\text{ эВ}$.

34.11. Найти электропроводность германия, если известно, что в нем содержится индия в концентрации 10^{22} м^{-3} и сурьмы

в концентрации 10^{21} м^{-3} . Принять подвижность в германии электронов $b_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и дырок $b_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

34.12. Показать, что при высоких температурах из уравнения молярной теплоемкости кристаллов в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна вытекает эмпирический закон Дюлонга и Пти.

34.13. Воспользовавшись уравнением Эйнштейна для молярной теплоемкости кристаллов, получить выражение для теплоемкости при низких температурах.

34.14. Сравнить молярную теплоемкость кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна с молярной теплоемкостью по закону Дюлонга и Пти. Характеристическая температура Эйнштейна $\Theta_E = T$.

34.15. Найти молярную энергию нулевых колебаний кристалла, для которого характеристическая температура Дебая $\Theta_D = 320 \text{ К}$.

34.16. Характеристическая температура Дебая для хлорида калия $\Theta'_D = 230 \text{ К}$, а для хлорида натрия $\Theta'_D = 280 \text{ К}$. Во сколько раз удельная теплоемкость KCl больше удельной теплоемкости NaCl при температуре 40 К ?

34.17. Показать, что при высоких температурах из уравнения Дебая для молярной теплоемкости кристаллов вытекает закон Дюлонга и Пти.

34.18. Воспользовавшись уравнением Дебая для молярной теплоемкости кристалла, получить выражение теплоемкости при низких температурах.

34.19. Пользуясь решением задачи 34.18, определить молярную теплоемкость свинца при $T = 20 \text{ К}$. Характеристическая температура Дебая $\Theta_D = 90 \text{ К}$.

34.20. Характеристическая температура Эйнштейна для меди $\Theta_E = 316 \text{ К}$. Найти постоянную квазиупругой силы.

34.21. Какова вероятность того, что электрон при температуре 27°С займет состояние, лежащее на $0,1 \text{ эВ}$ выше уровня Ферми?

34.22. Показать, что вероятность того, что электрон в металле будет иметь энергию, равную энергии Ферми, равна $0,5$.

34.23. Найти энергию Ферми для свободных электронов калия при абсолютном нуле. Считать, что на один атом приходится один свободный электрон.

34.24. Энергия Ферми при абсолютном нуле для натрия равна $3,15 \text{ эВ}$. Найти число свободных электронов, приходящихся на один атом натрия.

34.25. Концентрация свободных электронов проводимости в металлах $n = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Найти среднее значение энергии свободных электронов при абсолютном нуле.

34.26. Найти максимальную скорость электронов в металле при абсолютном нуле, если уровень Ферми $E_F = 5 \text{ эВ}$.

34.27. Пользуясь условием задачи 34.26, найти среднюю квадратичную скорость свободных электронов в металле через их максимальную скорость.

34.28. Концентрация свободных электронов натрия $n = 3,0 \times 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Найти скорость электронов на уровне Ферми при абсолютном нуле.

34.29. Найти теплоемкость электронов проводимости для натрия при 2 К и 1000 К . Концентрация свободных электронов $n = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Энергия Ферми $E_F = 7 \text{ эВ}$.

34.30. Найти теплоемкость электронов проводимости единицы объема меди при температуре 200 К . Значение энергии Ферми для меди $E_F = 7 \text{ эВ}$. Принять, что концентрация электронов равна числу атомов в единице объема.

§ 35. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Радиус ядра с массовым числом A :

$$R = 1,23 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м.}$$

Энергия связи ядра:

$$E_{св} = \Delta c^2.$$

Дефект массы ядра:

$$\Delta = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{1}{2}m_\alpha,$$

где Z — зарядовое число, m_p — масса протона, m_n — масса нейтрона.

Если взять не массу ядра $\frac{1}{2}m_\alpha$, а массу атома $\frac{1}{2}m_\alpha$ и вместо массы протона m_p записать массу атома водорода m_H , то

$$\Delta = Zm_H + (A - Z)m_n - \frac{1}{2}m_\alpha.$$

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 — число радиоактивных атомов в начальный момент времени $t = 0$, N — их число к моменту t , λ — постоянная радиоактивного распада.

Период полураспада:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

где λ — постоянная распада.

Активность радиоактивного препарата:

$$a = a_0 e^{-\lambda t},$$

где a_0 — начальная активность.

Строение ядра

35.1. Сколько протонов и нейтронов содержится в ядрах изотопов углерода: 1) ^{10}C ; 2) ^{11}C ; 3) ^{12}C ; 4) ^{13}C ; 5) ^{14}C ; 6) ^{15}C ?

35.2. Во сколько раз радиус ядра урана $^{238}_{92}\text{U}$ больше радиуса ядра атома водорода?

35.3. Найти плотность ядерного вещества. Считать, что в ядре с массовым числом A все нуклоны (нейтроны и протоны) плотно упакованы в пределах его радиуса.

35.4. Радиус Солнца 6,95 Мм, а средняя плотность 1410 кг/м³. Каким был бы радиус Солнца, если при той же массе его плотность равнялась бы плотности ядерного вещества?

35.5. Вычислить энергию связи ядра бора $^{11}_5\text{B}$.

35.6. Энергия связи дейтрона (ядра тяжелого водорода) 2,2 МэВ. Определить массу ядра и массу нейтрального атома в атомных единицах массы.

35.7. Вычислить энергию связи ядер ^3_1H и ^3_2He . Какое из этих ядер более устойчиво?

35.8. Найти энергию связи ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$. Какое из этих ядер более устойчиво?

35.9. Вычислить энергию связи, приходящуюся на один нуклон, в ядре бериллия ^9_4Be .

35.10. Сравнить энергию связи, приходящуюся в среднем на один нуклон, в ядрах дейтерия ^2_1H , железа $^{56}_{26}\text{Fe}$, ксенона $^{131}_{54}\text{Xe}$ и урана $^{238}_{92}\text{U}$.

Закон радиоактивного распада

35.11. Образец содержит 1000 радиоактивных атомов с периодом полураспада T . Сколько атомов останется через промежуток времени $T/2$?

35.12. Образец радиоактивного радона $^{222}_{86}\text{Rn}$ содержит 10¹⁰ радиоактивных атомов с периодом полураспада 3,825 сут. Сколько атомов распадается за сутки?

35.13. Определить постоянную радиоактивного распада радия $^{226}_{88}\text{Ra}$. Какая доля от первоначального числа атомов распадается за 3100 лет?

35.14. Через какое время в препарате полония $^{210}_{84}\text{Po}$ распадается 75,0% имеющихся атомов, если непрерывно удалять радиоактивные продукты распада?

35.15. За какое время произойдет распад полония $^{210}_{84}\text{Po}$ массой 2 мг, если в начальный момент его масса 0,2 г?

35.16. Определить период полураспада висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$, если известно, что висмут массой 1,0 г выбрасывает $4,58 \cdot 10^{15}$ β -частиц за 1 с.

35.17. Сколько ядер распадается за 1 с в препарате радиоактивного изотопа иридия $^{192}_{77}\text{Ir}$ и сколько останется атомов этого препарата через 30,0 сут, если первоначальная его масса равна 5,0 г?

35.18. Сколько α -частиц выбрасывает торий $^{232}_{90}\text{Th}$ массой 1 г за 1 с?

35.19. Радиоактивный препарат, имеющий активность $3,7 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, помещен в калориметр теплоемкостью 4,19 Дж/К. Найти повышение температуры в калориметре за 1 ч, если известно, что данное радиоактивное вещество испускает α -частицы с энергией 5,3 МэВ.

35.20. Сколько ядер распадается за 1 с в куске урана $^{238}_{92}\text{U}$ массой 1,0 кг? Какова активность этого урана?

35.21. Флюоресцирующий экран площадью 0,03 см² находится на расстоянии 1 см от пылинки радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ массой 18 мг. Сколько вспышек за 1 мин получится на экране?

35.22. Крупинка, содержащая радий $^{226}_{88}\text{Ra}$, находится на расстоянии 1,2 см от флюоресцирующего экрана. Какую массу имеет крупинка, если в течение 1 мин на площади экрана 0,602 см² удалось зарегистрировать 47 спинтилляций? (Продукты распада очень быстро откачиваются насосом.)

35.23. Больному ввели внутривенно раствор объемом 1 см³, содержащий искусственный радиоизотоп натрия $^{24}_{11}\text{Na}$ активностью $a_0 = 2000 \text{ с}^{-1}$. Активность крови объемом 1 см³, взятой через 5 ч, оказалась $a = 0,27 \text{ с}^{-1}$. Найти объем крови человека.

35.24. Месторождения радиоактивных элементов всегда сопутствует свинец, который является конечным продуктом их распада. Известно, что ториевый ряд заканчивается изотопом свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Считая возраст ториевой руды $4 \cdot 10^9$ лет, определить, сколько свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$ появилось в этой руде на 1 кг находившегося там тория $^{232}_{90}\text{Th}$.

35.25. Элемент тория $^{232}_{90}\text{Th}$ в результате радиоактивного распада превращается в изотоп свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Сколько α - и β -частиц выбрасывает при этом каждый атом?

35.26. Радиоактивный элемент нептуния $^{241}_{93}\text{Np}$, являющийся родоначальником искусственно полученного радиоактивного семейства нептуния, в результате распада превращается в стабильный изотоп висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$. Найти число α - и β -распадов.

35.27. Радиоактивный изотоп кремния $^{27}_{14}\text{Si}$ распадается, превращаясь в алюминий $^{27}_{13}\text{Al}$. Какая частица при этом выбрасывается?

35.28. В какой элемент превращается уран $^{238}_{92}\text{U}$ после трех α - и двух β -превращений?

35.29. Вещество радиоактивного элемента, подвергнувшись ряду превращений, потеряло одну α - и две β -частицы и превратилось в ядро урана $^{235}_{92}\text{U}$. Найти исходный радиоактивный элемент.

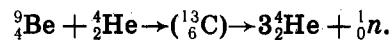
35.30. В какой элемент превращается радий $^{226}_{88}\text{Ra}$ после пяти α - и четырех β -распадов?

35.31. Радий массой 1 г испускает за 1 с $3,7 \cdot 10^{10}$ α -частиц, обладающих скоростью $v = 15$ Мм/с. Найти полную энергию, выделяющуюся при α -распаде за 1 ч.

Ядерные реакции

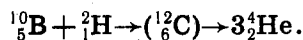
35.32. При обстреле α -частицами ядра азота $^{14}_7\text{N}$ возможен захват такой частицы ядром атома. На мгновение образуется чрезвычайно неустойчивое ядро фтора, которое сразу же распадается и превращается в устойчивое ядро кислорода. Данная ядерная реакция была впервые осуществлена в 1919 г. Резерфордом. Написать уравнение реакции и определить, выделяется или поглощается энергия при этой реакции. Найти энергию, выделившуюся или поглощенную в результате реакции.

35.33. Найти энергию, поглощаемую при ядерной реакции



35.34. Ядро бериллия ^9_4Be , захватывая дейтрон, превращается в ядро бора $^{10}_5\text{B}$. Написать уравнение реакции и определить выделяющуюся энергию.

35.35. При обстреле ядер атомов бора $^{10}_5\text{B}$ ядрами тяжелого водорода ^2_1H происходит ядерная реакция

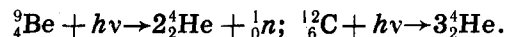


Определить энергию, выделяющуюся при этом превращении.

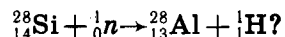
35.36. Ядро лития ^7_3Li , захватывая протон, распадается на две α -частицы. Написать ядерную реакцию и определить энергию, выделяющуюся при этой реакции.

35.37. Атомы лития ^7_3Li бомбардируются протонами, кинетическая энергия которых 1 МэВ. Образующиеся при этом две α -частицы летят с одинаковой скоростью. Определить кинетическую энергию этих частиц.

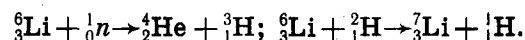
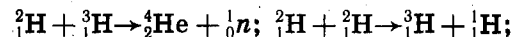
35.38. Определить минимальную энергию γ -квантов, необходимую для расщепления ядер бериллия и ядер углерода по реакциям:



35.39. Какой минимальной кинетической энергией должен обладать нейтрон, чтобы он был в состоянии при столкновении с ядром кремния $^{28}_{14}\text{Si}$ вызвать ядерную реакцию



35.40. Найти энергию, выделяющуюся при следующих термоядерных реакциях:



35.41. Французские ученые Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри, открывшие искусственную радиоактивность, подвергли бомбардировке α -частицами бор $^{10}_5\text{B}$, алюминий $^{27}_{13}\text{Al}$ и магний $^{24}_{12}\text{Mg}$. Написать ядерные реакции.

35.42. Ядро бора $^{10}_5\text{B}$ может захватывать нейтрон, в результате

чего происходит расщепление ядра бора на ядра лития и гелия. Написать ядерную реакцию и определить энергию, освобождающуюся при этой реакции.

35.43. При облучении нейтронами атомов $^{23}_{11}\text{Na}$ последний превращается в радиоактивный изотоп $^{24}_{11}\text{Na}$ с периодом полураспада 15,3 ч. Какая доля первоначальной массы радиоактивного натрия останется через 30,6 ч после прекращения облучения нейтронами?

35.44. При облучении α -частицами алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ испускается нейтрон и образуется изотоп фосфора $^{30}_{15}\text{P}$. Образовавшийся изотоп фосфора является радиоактивным и распадается с испусканием позитронов. Данная реакция образования позитронно-активного вещества была открыта Фредериком Жолио-Кюри. Написать эту реакцию и определить выделяющуюся в ней энергию.

35.45. Ядро урана $^{238}_{92}\text{U}$, испуская α -частицу с энергией 4,2 МэВ, превращается в ядро тория $^{234}_{90}\text{Th}$. Определить массу атома $^{234}_{90}\text{Th}$, если масса атома $^{238}_{92}\text{U}$ равна 238,05353 а. е. м.

35.46. Определить энергию, выделяющуюся при образовании из протонов и нейтронов гелия массой 1 г.

35.47. Сколько энергии можно получить при расщеплении урана $^{235}_{92}\text{U}$ массой 1 г, если при расщеплении каждого ядра урана выделяется энергия 200 МэВ?

35.48. Сколько энергии выделится при ядерном делении урана $^{235}_{92}\text{U}$ массой 1 кг в урановом реакторе? Сколько угля необходимо сжечь для получения такого же количества теплоты (калорийность угля принять равной 29,3 МДж/кг)? Определить, какой груз можно было бы поднять на высоту 5 км за счет энергии, освобождающейся при реакции деления. Считать, что средняя энергия, выделяющаяся при делении одного атома урана, составляет 200 МэВ.

35.49. Энергия излучения Солнца возникает вследствие цепочки ядерных реакций слияния, конечным результатом которых является превращение четырех атомов водорода в один атом гелия. Определить, сколько воды можно было бы нагреть от 0°C до кипения за счет превращения в гелий 4 г водорода.

35.50. Ядро урана $^{235}_{92}\text{U}$ поглощает нейтрон, движущийся с тепловой скоростью. Написать уравнение реакции.

35.51. При облучении в реакторе стабильный кобальт $^{59}_{27}\text{Co}$ превращается в радиоизотоп $^{60}_{27}\text{Co}$: $^{59}_{27}\text{Co} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co}$. $^{60}_{27}\text{Co}$ испытывает β -распад, превращаясь в никель $^{60}_{28}\text{Ni}$. Найти энергию γ -излучения образовавшегося ядра $^{60}_{28}\text{Ni}$.

35.52. При сгорании ядерного топлива на атомной электростанции за 1 с выделяется приблизительно 28,5 МДж энергии. Сколько ядерного горючего расходует станция за сутки, если принять, что один атом урана $^{235}_{92}\text{U}$ при делении на два осколка выделяет 200 МэВ энергии?

35.53. Мощность уранового реактора 1 МВт. Сколько урана

${}^{235}_{92}\text{U}$ потребляет он за 1 ч, если при делении каждого ядра урана выделяется энергия 200 МэВ?

35.54. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей уран ${}^{235}_{92}\text{U}$ массой 0,1 кг в сутки, если КПД станции 16%.

35.55. Реактор мощностью 100 МВт производит плутоний ${}^{239}_{94}\text{Pu}$. Исходя из того, что в среднем при одном акте деления ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ возникает 1,5 ядра ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, найти, сколько при этом образуется плутония в течение 10 дней.

§ 36. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Полная энергия релятивистской частицы:

$$E = m_0 c^2 + E_k,$$

где E_k — кинетическая энергия частицы.

Импульс релятивистской частицы:

$$pc = \sqrt{E_k(E_k + 2m_0 c^2)}.$$

При рассмотрении столкновения частиц полезно использовать инвариантную величину:

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4,$$

где E и p — полная энергия и импульс системы, m_0 — масса покоя образовавшейся частицы.

36.1. Импульсы протонов равны 1,0 и 10 ГэВ/с (c — скорость света). Найти их кинетические энергии.

36.2. Покажите, что при столкновении фотона со свободным электроном он не может передать ему всю свою энергию.

36.3. В результате неупругого столкновения релятивистской частицы с кинетической энергией $E_k = m_0 c^2$ с такой же частицей, покоящейся относительно неподвижной системы отсчета, образуется составная частица. Найти массу покоя m'_0 составной частицы.

36.4. μ^- -Мюон испытывает упругое лобовое столкновение с неподвижным электроном. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если кинетическая энергия μ^- -мюона до столкновения $E_k = 100$ МэВ.

36.5. Показать, что рождение пары электрон — позитрон одним квантом возможно только в том случае, когда в реакции участвует частица с массой покоя $m_1 \neq 0$.

36.6. Процесс аннигиляции электрона e^- и позитрона e^+ происходит по схеме:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Найти угол между направлениями разлета γ -квантов с одинаковыми энергиями, если кинетическая энергия позитрона до его столкновения с покоящимся электроном была равна $E_k = 0,75$ МэВ.

36.7. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные 240 кэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию каждого фотона и соответствующую ему длину волны.

36.8. Пользуясь условием задачи 36.7, найти импульс, соответствующий каждому фотону.

36.9. Процесс возникновения пары электрон — позитрон происходит по следующей схеме:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Найти, какой скоростью будут обладать возникшие частицы, если энергия фотона $E = 3,02$ МэВ.

36.10. Пользуясь условием задачи 36.9, найти полную кинетическую энергию электрона и позитрона в момент их рождения.

36.11. Схема распада π^0 -мезона на лету:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Найти угол между направлениями разлета γ -квантов, если их энергии E_1 и E_2 , а масса покоя π^0 -мезона m_0 .

36.12. Покоящийся π^0 -мезон, распадаясь, превращается в два одинаковых γ -фотона. Определить энергию каждого фотона.

36.13. Свободный нейтрон распадается по схеме:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Найти суммарную кинетическую энергию всех частиц, возникающих в процессе распада нейтрона. Кинетической энергией нейтрона и массой покоя антинейтрино пренебречь.

36.14. μ^- -Мюон пролетел в неподвижной системе отсчета от места своего рождения до точки распада $l = 4,6$ км. Найти собственное время жизни μ^- -мюона, если скорость его движения $v = 0,99$ с.

36.15. В результате столкновений протонов с внутренней мишенью синхротрона рождаются π -мезоны. Скорость в пучке π -мезонов, являющихся нестабильными частицами с периодом полураспада 25,5 нс, равна 180,0 Мм/с. За какое время распадается половина π -мезонов? Определить путь, который они успевают пройти за это время.

36.16. Среднее время жизни K^+ -мезонов $\langle \tau_0 \rangle = 12,3$ нс. Найти средний путь, проходимый K^+ -мезонами с кинетической энергией, которая в $\eta = 1,2$ раза превышает их энергию покоя.

36.17. λ^0 -Гипероны пролетают от места рождения до распада расстояние $l = 0,7$ м. Найти собственное время жизни этих частиц. Считать, что кинетическая энергия λ^0 -гиперонов $E_k = 10$ ГэВ. Масса λ^0 -гиперона $m = 1,988 \cdot 10^{-27}$ кг.

36.18. Электрон прошел разность потенциалов и приобрел кинетическую энергию 0,76 МэВ. Определить скорость электрона.

36.19. Найти скорость электрона, если его полная энергия $E = 1,02$ МэВ.

36.20. Определить скорость электрона, прошедшего разность потенциалов 1,0 МВ.

36.21. Электрон, обладающий кинетической энергией $E_k = 300$ МэВ, влетел в камеру Вильсона и оставил след в виде дуги окружности. Камера находится в однородном магнитном поле индукцией $B = 10$ Тл. Определить радиус.

36.22. Радиус кривизны траектории электрона и позитрона, образованных в камере Вильсона фотоном энергией 6,00 МэВ, равен 3,5 см. Какова индукция магнитного поля, в котором находится камера Вильсона?

36.23. Синхрофазотрон сообщает протонам кинетическую энергию 10 ГэВ. Во сколько раз релятивистская масса протона больше его массы покоя?

36.24. В магнитном поле циклотрона под действием разности потенциалов между дуантами происходит движение протонов. Сколько оборотов они должны сделать, чтобы их масса возросла на 5% по сравнению с массой покоящихся протонов? Между дуантами протоны проходят всегда при максимальной разности потенциалов, равной 30 кВ.

36.25. В стенке атомного реактора имеется графитовый стержень. Объясните, почему через торец такого стержня выходят только медленные нейтроны.

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

1.1. При прямолинейном движении тела и одинаковом направлении.

1.2. $s = 5t$, 25 м.

1.3. $\frac{4v_1v_2v_3v_4}{v_1v_2v_3 + v_2v_3v_4 + v_1v_3v_4 + v_1v_2v_4} = 9,6$ м/с.

1.4. 10 м/с.

1.5. $v_2 = (s - v_1t)/t = 20$ м/с.

1.6. $v_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{s_1}{t_1} + \frac{s_2}{t_2} \right) = 5$ м/с; $v_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{s_2}{t_2} - \frac{s_1}{t_1} \right) = 1,5$ м/с.

1.7. $t = t_1t_2/(t_1 - t_2) = 40$ с.

1.8. $t_2/t_1 = (v_1 + v_2)/(v_2 - v_1) = 1,5$.

1.9. 8 м/с; 2 м/с.

1.10. $t_1 = s/(v_1 - v_2) \approx 1$ ч 14 мин; $t_2 = s/(v_1 + v_2) \approx 1$ ч.

1.11. $v = \frac{v_2}{\tan \alpha} - v_1 \approx 2,3$ м/с.

1.12. $t = s(\sqrt{v_1^2 - v_2^2 \sin^2 \alpha} + v_2 \cos \alpha)/(v_1^2 - v_2^2) = 1$ ч 54 мин.

1.13. 1,2 м/с.

1.14. $v_1 = \sqrt{v^2t^2 - s^2}/t = 152$ м/с.

1.15. $s = (c + v)^2t/2c$.

1.16. Второй быстрее в $t_1/t_2 = \sqrt{(v_1 + v_2)/(v_1 - v_2)} = 2$ раза.

1.17. 7 м/с; 11,4 м/с; 9 м/с.

1.18. Прямая $3x - 2y = 12$, расположенная в плоскости XY, с началом в точке $x_0 = 2$, $y_0 = -3$ (рис. 1).

1.19. 200 м/с; 20 м/с².

1.20. 410 м.

1.21. 28 с.

1.22. 86 м.

1.23. -2.

1.24. 18 м; 48 м. График зависимости ускорения лифта от времени приведен на рисунке 2.

1.25. 12 с; 8,3 м/с².

1.26. $a = (v_2^2 - v_1^2)/2s = 5$ м/с²; $t = 2s/(v_1 + v_2) = 2$ с.

1.27. $a = 2s(t_1 - t_2)/t_1t_2(t_1 + t_2) = 5$ м/с²;

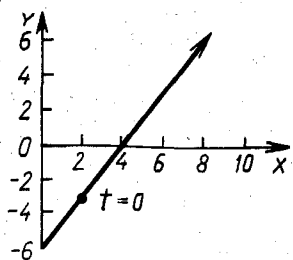


Рис. 1

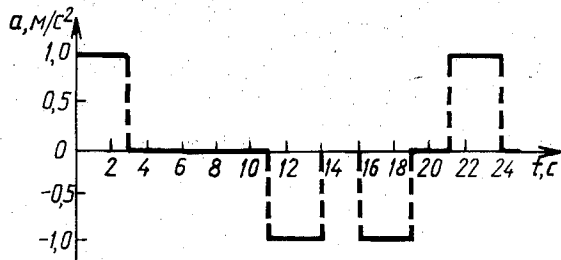


Рис. 2

$$v_1 = \frac{s(2t_1t_2 + t_2^2 - t_1^2)}{t_1t_2(t_1 + t_2)} = 2,5 \text{ м/с.}$$

1.28. 400 м.

1.29. 10.

1.30. $t = \frac{h}{v} + \frac{v}{a} = 32 \text{ с.}$

1.31. $v_0 = \frac{1}{2} \sqrt{g(8h + gt^2)} = 39 \text{ м/с.}$

1.32. $t = \frac{t_1}{n} - \frac{v_0}{g} \pm \sqrt{\frac{v_0^2}{g^2} + (1-n)\frac{t_1^2}{n^2}} = 6 \text{ с; } 78,4 \text{ м/с; } 294 \text{ м.}$

1.33. $t = \sqrt{2} \frac{v_0}{g} = 3 \text{ с.}$

1.34. Высота n -го шарика над полом $h_n = \frac{g}{2} n^2 (\Delta t)^2$, где Δt — промежуток времени между двумя ударами. Расстояние между двумя соседними шариками $h_n - h_{n-1} = \frac{g}{2} (\Delta t)^2 [n^2 - (n-1)^2]$. Тогда отношение расстояний между шариками

$$\frac{h_{n+1} - h_n}{h_n - h_{n-1}} = \frac{2n+1}{2n-1},$$

т. е. расстояния между шариками относятся как члены ряда нечетных чисел. Отношение расстояний от шариков до пола $\frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{(n+1)^2}{n^2}$ равно отношению квадратов целых чисел.

1.35. $v_0 = \frac{gt}{2} = 29 \text{ м/с.}$

1.36. 12,4 м/с.

1.37. $a = g \operatorname{ctg} \alpha = 17 \text{ м/с}^2$.

1.38. Парабола $y = 2x^2$.

1.39. 5,8 м/с; 1 м/с².

1.40. $v = l \sqrt{2gh/2h} \approx 200 \text{ м/с.}$

1.41. $t = v_0 \sin \alpha / g = 8 \text{ с.}$

1.42. 76°.

1.44. 45°.

1.45. $y = \frac{gx^2}{2v_0^2}$; $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} = 22 \text{ м/с}$; $\alpha = 63^\circ$.

1.46. $s = 2v_0 t \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = 11,3 \text{ м.}$

1.47. $h = v_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta) \cos^2 \alpha / 2g = 6,8 \text{ м.}$

1.48. $t = \frac{v_0 \cos \alpha}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) = 1,2 \text{ с.}$

1.49. $a_r = g^2 t / \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2} = 6,9 \text{ м/с}^2$;

$$a_n = \frac{v_0 g}{\sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}} = 6,9 \text{ м/с}^2; 45^\circ.$$

1.50. Окружность $x^2 + y^2 = 9$; $s = 3\omega t$.

1.51. Эллипс $\frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{4} = 1$.

1.52. 295 м/с.

1.53. 800 м/с.

1.54. $\Delta v = \frac{vd}{R} \approx 1,1 \text{ м/с.}$

1.55. До момента падения на площадку диск будет двигаться по параболе, имея горизонтальную составляющую скорости, равную скорости тележки. С момента падения на площадку скорость диска будет $v_x = v_{0x} - \pi n D = -3,2 \text{ м/с}$, т. е. диск будет двигаться в противоположном направлении от тележки.

1.56. $v = \frac{\pi n D v_1}{N} = 6,28n \text{ м/с}$, где n — целое число.

1.57. $n = \frac{v_0 t}{2\pi D} = 11$ оборотов; $\langle \epsilon \rangle = -\frac{2v_0}{Dt} = -15,9 \text{ с}^{-2}$.

1.58. 21 м/с; -1 м/с; 14,9 м/с; 20 с⁻¹.

1.59. $\epsilon = \frac{\pi}{N} (n^2 - n_0^2) = 3,8 \text{ с}^{-2}$.

1.60. $\langle \omega \rangle = \frac{\pi \nu v}{l} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $\langle \epsilon \rangle = \frac{\pi \nu v^2}{l^2} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-2}$.

1.61. $\omega_z = 2(10 - t) \text{ с}^{-1}$; $\epsilon_z = -2 \text{ с}^{-2}$. Тело вращается равнозамедленно и в момент $t = 10 \text{ с}$ останавливается, а затем направление вращения изменяется на противоположное. Графики зависимости угловой скорости и углового ускорения тела от времени приведены на рисунках 3, а и б.

1.62. $v_{\max} = \frac{2\pi}{T} A = 7,8 \text{ см/с}$; $a_{\max} = \frac{4\pi^2}{T^2} A = 12 \text{ см/с}^2$.

1.63. 1 с.

1.64. $x = 0,05 \sin \pi (t + 0,25)$.

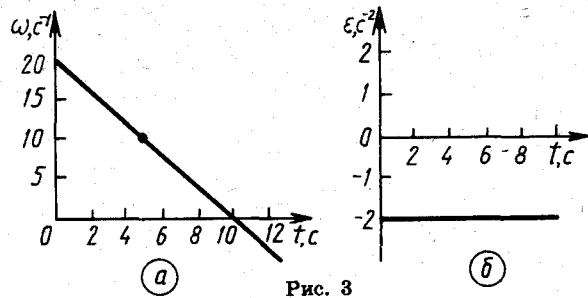


Рис. 3

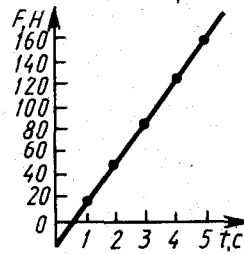


Рис. 4

1.65. $v_{\max} = \frac{2\pi}{T} A = 9,4 \text{ см/с}$; $a_{\max} = \frac{4\pi^2}{T^2} A = 0,29 \text{ м/с}^2$; $\varphi = -90^\circ$.

1.66. $\varphi_0 = 15^\circ$.

1.67. $v_{\max} = \frac{1}{2} \frac{v l}{R} = 2,9 \text{ м/с}$; $a_{\max} = \frac{1}{2} \frac{v^2 l}{R^2} = 169 \text{ м/с}^2$.

1.68. $x = 6,8 \sin(2\pi t - 72^\circ 50')$.

1.69. $0,5 \text{ Гц}$.

1.70. $x^2 + y^2 = 4$. Движение происходит по кругу против часовой стрелки.

2.1. 162 Н ; см. рис. 4.

2.2. $v = D \sqrt{\frac{\pi p l}{2m}} \approx 330 \text{ м/с}$.

2.3. 1 кН ; $0,01$; 2 м/с .

2.4. $0,2 \text{ м}$.

2.5. $s = v_0^2 / 2g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) = 7,7 \text{ м}$;

$t = v_0 / g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) = 1,5 \text{ с}$.

2.6. $\mu = (v_0^2 - 2sg \sin \alpha) / 2sg \cos \alpha = 0,16$.

2.7. Время спуска больше времени подъема, и конечная скорость при спуске меньше начальной скорости подъема в

$$n = \sqrt{\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}} = 1,5 \text{ раза.}$$

2.8. $\mu = v_0^2 / 2gs = 0,64$.

2.9. $F = \mu m_2 g / (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) = 10 \text{ Н}$;

$a = \mu m_2 g \cos \alpha / (m_1 + m_2)(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) = 0,35 \text{ м/с}^2$.

2.10. $s = (m_2 - m_1)gt^2 / 2(m_1 + m_2) = 0,98 \text{ м}$.

2.11. $a = \frac{2F}{m} - g = 2,2 \text{ м/с}^2$.

2.12. $F_l = Fl/L = 100 \text{ Н}$.

2.13. $s = \frac{1}{2}(g - a)(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)t^2 = 1 \text{ м}$.

2.14. $a = g \frac{m_1(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - m_2(\sin \beta - \mu \cos \beta)}{m_1 + m_2} = 4,7 \text{ м/с}^2$.

2.15. $a = (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)g = 1,3 \text{ м/с}^2$;

$s = v_0 t + \frac{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)gt^2}{2} = 160 \text{ м}$.

2.16. $s = \frac{[F(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu mg]}{2m} = 2,4 \text{ м}$.

2.17. $a = \frac{F}{m}(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu g = 1 \text{ м/с}^2$.

2.18. $x = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)l / (1 + \sin \alpha + \mu \cos \alpha)$.

2.19. $0,2$.

2.20. $1,5 \text{ м/с}^2$.

2.21. $F = 4m_1 m_2 g / (m_1 + m_2) = 26 \text{ Н}$;

$F = 4m_1 m_2 (g + a) / (m_1 + m_2) = 34 \text{ Н}$.

2.22. $a = g \frac{m_1 m_2 + m_1 m_3 - 4m_2 m_3}{m_1 m_2 + m_1 m_3 + 4m_2 m_3} = 0,58 \text{ м/с}^2$.

2.23. $a = \frac{m_2 g + \mu m_1 g}{m_1 - \mu m_2} = 6,2 \text{ м/с}^2$.

2.24. $a = g \tan \alpha = 5,7 \text{ м/с}^2$.

2.25. $F = m \sqrt{a^2 + g^2} = 1,4 \text{ Н}$; 45° .

2.26. $a = \frac{mg}{2} \frac{\sin 2\alpha}{M + m \sin \alpha} = 2 \text{ м/с}^2$.

2.27. $v_0 > \sqrt{2\mu gl(1 + m/M)}$.

2.28. $x = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 \frac{gt^2}{2} = 0,54 \text{ м}$;

$a_c = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 g = 1,1 \text{ м/с}^2$.

2.29. $s = \frac{m_1}{m_1 + m_2} l = 1 \text{ м}$.

2.30. $l = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} h = 5 \text{ см}$.

2.31. $h = \frac{ut}{2} \ln \frac{M}{M - Qt} - \frac{gt^2}{2} = 65 \text{ км}$.

2.32. $Q = \frac{Mg}{u} e^{-\frac{gt}{u}}$.

2.33. $v = \frac{F}{Q} \ln \frac{M}{M - Qt} = 6,2 \text{ м/с}$.

2.34. $\mu = 4\pi^2 n^2 R / g = 0,1$.

2.35. $v = \sqrt{\mu R g} = 24 \text{ м/с}$.

2.36. $v = \sqrt{gR/3} = 10 \text{ м/с}$.

2.37. $T = 2\pi \sqrt{l \cos \alpha / g} = 1 \text{ с}$.

2.38. $h = l(1 - F/3mg) = 0,26 \text{ м}$.

2.39. 2 с .

2.40. $x_{\min} = \frac{g(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{\omega^2 \sin \alpha (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} = 0,19 \text{ м}$;

$x_{\max} = \frac{g(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{\omega^2 \sin \alpha (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)} = 0,42 \text{ м}$.

3.1. $A = sm[g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + \frac{2s}{t^2}] = 170 \text{ Дж}$.

$$3.2. A = \frac{mv}{2} (gt - v) = 160 \text{ Дж.}$$

$$3.3. N = mgv(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = 26 \text{ кВт.}$$

$$3.4. N = mg(gt - v_0 \sin \alpha) = 440 \text{ Вт;}$$

$$A = mg \left(\frac{gt^2}{2} - v_0 \sin \alpha \right) = 1 \text{ кДж.}$$

$$3.5. A = sm(a + g \sin \alpha + \mu g \cos \alpha) = 44 \text{ МДж.}$$

$$3.6. N = \frac{mh}{\eta t} \left(g + \frac{2h}{t^2} \right) = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Вт.}$$

$$3.7. A = smg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = 4,4 \cdot 10^9 \text{ Дж;}$$

$$N = mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)v = 3,3 \cdot 10^7 \text{ Вт.}$$

$$3.8. N = \frac{nmv}{2} \left(kg + \frac{v}{t} \right) = 350 \text{ кВт.}$$

$$3.9. A = \frac{mga}{2} (\sqrt{2} - 1) = 2 \text{ Дж.}$$

$$3.10. 12,7 \text{ кДж.}$$

$$3.11. v_1/v_2 = \sqrt{2\mu \sin 2\alpha} = 0,2.$$

$$3.12. A = F \frac{h}{\sin \alpha} = 100 \text{ Дж. Одна часть работы пойдет на нагревание тела и наклонной плоскости (A_{тр} = \mu mgh \operatorname{ctg} \alpha = 6,8 \text{ Дж}), другая часть — на увеличение потенциальной (E_p = mgh = 19,6 \text{ Дж}) и кинетической (E_k = A - E_p - A_{тр} = 73,6 \text{ Дж}) энергий тела.$$

$$3.13. \cos \alpha = 1 - \frac{m^2 v^2}{M^2 2gl} = 0,898; \alpha \approx 26^\circ.$$

$$3.14. N = \rho ghQ = 2,9 \text{ ГВт, где } \rho \text{ — плотность воды.}$$

$$3.15. E_k = mgh(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 23 \text{ Дж.}$$

$$3.16. 1 - \frac{m}{M+m}.$$

$$3.17. 1) v_1 = (m_2 - m_1) \sqrt{2gl/(m_1 + m_2)} = 3,8 \text{ м/с;}$$

$$v_2 = 2m_1 \sqrt{gl/(m_1 + m_2)} = 2,5 \text{ м/с.}$$

$$2) v = m_1 \sqrt{2gl/(m_1 + m_2)} = 1,3 \text{ м/с;}$$

$$\eta = m_2/(m_1 + m_2) = 0,8.$$

$$3.18. \Delta E = m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2 / 2(m_1 + m_2) = 120 \text{ Дж.}$$

$$3.19. m_1 = \frac{m_2}{3} = 0,2 \text{ кг.}$$

$$3.20. v = m \sqrt{2gh/M(M-m)}.$$

$$3.21. M = m(1 + v^2/2gs) = 19,2 \text{ кг.}$$

$$3.22. N = mg^2 t = 96 \text{ Вт.}$$

$$3.23. 1) v_0 = \sqrt{gR(3\sin \alpha - 2)} = 2,4 \text{ м/с.}$$

$$2) v_0 = \sqrt{gR \left[\left(3 + \pi \mu \frac{90^\circ - \varphi}{180^\circ} \right) \sin \varphi - 2 \right]} = 2,5 \text{ м/с.}$$

$$3.24. Q = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho gh - mg(h + h_1) = 22 \text{ мДж.}$$

$$3.25. l = mv^2/2[F(\cos \beta + \mu \sin \beta) - mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)] = 0,32 \text{ м.}$$

$$3.26. \text{Время падения.}$$

$$3.27. \text{При сообщении шару скорости, направленной вертикально вниз, его скорость в момент падения будет больше. Скорости были бы одинаковыми в обоих случаях, если бы не сказывалось влияние трения о воздух.}$$

$$3.28. \text{Зависит, так как при изменении скорости подъема будет совершаться работа не только на увеличение потенциальной энергии, но и на сообщение телу ускорения.}$$

$$3.29. A = \frac{1}{2} \mu mgl \alpha.$$

$$3.30. -1,4 \text{ м/с.}$$

$$3.31. \Delta t = \frac{2mv}{F} \sin \frac{\alpha}{2} = 0,045 \text{ с.}$$

$$3.32. a = \frac{\rho S v^2 - rmg}{m} = 0,15 \text{ м/с}^2, \text{ где } \rho \text{ — плотность воды.}$$

$$3.33. v_0 = \sqrt{\mu g(2s + \mu gt^2)} = 3,7 \text{ м/с.}$$

$$3.34. v = m_1 v_1 / (m_1 + m_2) = 1,6 \text{ м/с.}$$

$$3.35. 44 \text{ м/с.}$$

$$3.36. v_0 = M \sqrt{2\mu gs/m \cos \alpha} = 970 \text{ м/с.}$$

$$3.37. s = \frac{(2v_0 \cos \alpha - v_1)s_1 + 3v_1 v_0 \cos \alpha t}{2(v_0 \cos \alpha + v_1)} = 19 \text{ м.}$$

$$3.38. v_1 = [Mv + m(v + u)]/(M + m) = 5,1 \text{ м/с; } v_2 = v = 5 \text{ м/с;}$$

$$v_3 = \frac{Mv + m(v - u)}{M + m} = 4,9 \text{ м/с.}$$

$$3.39. v_1 = -v_2 = \frac{M}{M + 2m} v = 3,3 \text{ м/с;}$$

$$v' = -v'_2 = \frac{M - m}{M + m} v = 3 \text{ м/с.}$$

$$3.40. F = m \sqrt{2gH/\Delta t} = 20 \text{ кН.}$$

$$3.41. \vec{M} = -10\vec{i} + 11\vec{j} + 2\vec{k} \text{ (Н·м); } M = 15 \text{ Н·м; } M_z = 2 \text{ Н·м.}$$

$$3.42. L = mv_0^3 \sin^2 \alpha \cos \alpha / 2g = 14 \text{ кг·м}^2/\text{с.}$$

$$3.45. v_c = 0,33 \text{ м/с; } \omega = 0,3 \text{ рад/с.}$$

$$3.48. L = \frac{1}{2} mgv_0 \cos \alpha t^2.$$

$$3.49. \Delta \vec{L} = -15\vec{i} \text{ кг·м}^2/\text{с.}$$

$$4.1. I = \frac{7}{5} mR^2 = 0,07 \text{ кг·м}^2.$$

$$4.2. 6 \cdot 10^{-2} \text{ кг·м}^2.$$

$$4.3. 9,8 \cdot 10^{37} \text{ кг·м}^2.$$

$$4.4. I = mR^2(g - a)/a = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг·м}^2.$$

$$4.5. M = \pi n m R^2 / t = 0,38 \text{ Нм.}$$

$$4.6. a = (m_2 - m_1)g / \left(m_1 + m_2 + \frac{m}{2} \right) = 1,8 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon = (m_2 - m_1)g / \left(m_1 + m_2 + \frac{m}{2} \right) R = 18 \text{ с}^{-2}.$$

$$4.7. v = \frac{2R}{r} \sqrt{\frac{hmg}{m_1 + 2m}} = 21 \text{ м/с}.$$

$$4.8. t = \frac{\pi n}{m_3 g r} [r^2(m_2 + 2m_3) + 2m_1 R^2] = 21 \text{ с}.$$

$$4.9. s = m_2 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) t^2 / (2m_2 + m_1) = 2,6 \text{ м}.$$

$$4.10. s = 3v_0^2 / 4g \sin \alpha = 7,5 \text{ м}.$$

$$4.11. v = \frac{5}{7} g t \sin \alpha = 5,2 \text{ м/с}.$$

$$4.12. N = \frac{m R^2 \omega^2}{4t} = 4 \text{ кВт}.$$

$$4.13. E_k = \frac{3}{4} m v^2 = 6 \text{ Дж}.$$

$$4.14. 16 \text{ кДж}.$$

$$4.15. M = \frac{\pi n m R^2}{t} = 14 \text{ Нм}; A = 2\pi^2 n^2 m R^2 = 36 \text{ кДж}.$$

$$4.16. N = \frac{2\pi^2 n^2}{t} \left(\frac{m_1}{2} + m_2 \right) = 190 \text{ Вт}.$$

$$4.17. \Delta E = 2\pi^2 n^2 R^2 m_1 m_2 / (m_1 + m_2) = 16 \text{ Дж}.$$

$$4.18. \text{При скольжении без трения скорость больше в 1,4 раза}.$$

$$4.19. s = 1,4h / \sin^3 \alpha = 1,4 \text{ м}.$$

$$4.20. n = 3Fl / 4\pi Mg\mu R.$$

$$4.21. \omega = \frac{\rho_1 \omega_1 + \rho_2 \omega_2}{\rho_1 + \rho_2} = 8,8 \text{ с}^{-1}.$$

$$4.22. 49 \text{ Н}; 98 \text{ Н}.$$

$$4.23. F = 2mg \cos \frac{\alpha}{2} = 85 \text{ Н}.$$

$$4.24. m_1 = \frac{m_2 (\cos \alpha_2 - \mu \sin \alpha_2) + \mu m}{\cos \alpha_1 + \mu \sin \alpha_1} = 7,6 \text{ кг}.$$

$$4.25. l = 2a \sqrt{1 - m^2 g^2 / 4F^2} = 0,94 \text{ м}.$$

$$4.26. 21 \text{ Н}.$$

$$4.27. h = \frac{2R}{\tan \alpha} = 0,3 \text{ м}.$$

$$4.28. F_A = 3,7 \text{ кН}; F_B = 2,2 \text{ кН}.$$

$$4.29. F = F_r \tan \alpha = 11 \text{ Н}.$$

$$4.30. \mu = 1.$$

$$4.31. \tan \varphi = 2\mu; \varphi = 31^\circ.$$

$$4.32. 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

$$4.33. x_0 = 0,12 \text{ м}; y_0 = 0,058 \text{ м}.$$

$$4.34. \text{Центр масс смещен в сторону свинцовой части на расстояние 0,25 м от геометрического центра стержня}.$$

$$4.35. \text{Центр масс смещен на 0,01 м от центра диска}.$$

$$4.36. h < 2R.$$

$$5.1. h = 2mv^2 / \pi \rho l g d^2 = 31 \text{ м}.$$

$$5.2. F = V[(\rho_T - \rho_K)g + \rho_T a] = 31 \text{ кН}.$$

$$5.3. \eta = mgS_1 h_1 n / S_2 N t = 0,54 \text{ (54\%)}.$$

$$5.4. \text{Медный}; V = \rho_m - \rho_a / \rho_m \rho_a = 10^{-3} \text{ м}^3.$$

$$5.5. V_\eta = (\rho_{PT} - \rho_{CT}) / (\rho_{PT} - \rho_A) V \approx 0,47 V.$$

$$5.6. m = \frac{m_1 [(1-n)\rho_2 - \rho_1] \rho_3}{(\rho_3 - \rho_2) \rho_1} = 2,7 \text{ кг, где } \rho_2 - \text{плотность воды,}$$

$$\rho_3 - \text{плотность пробки}.$$

$$5.7. p = \rho h(g + a) = 2 \text{ кПа}.$$

$$5.8. m = p_2 V (\rho_1 - 2\rho) / 2(\rho_2 - \rho_1) = 17 \text{ кг}; T = \frac{Vg}{2} (\rho_1 - 2\rho_2) = 150 \text{ Н},$$

$$\text{где } \rho, \rho_1, \rho_2 - \text{плотности пробки, воды и железа соответственно}.$$

$$5.9. T = \rho g l \frac{S_1 S_2}{S_1 - S_2}.$$

$$5.10. \frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{2gth + vl}{2gth - vl} \right)^2 = 3,5 \text{ раза}.$$

$$5.11. 0,5 \text{ м}.$$

$$5.12. v_1 = \sqrt{2gh + al} = 4,6 \text{ м/с}; v_2 = \sqrt{2gh - al} = 4,2 \text{ м/с}.$$

$$5.13. Q = \frac{Sl}{2h} \sqrt{2gh} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$5.14. v_{\max} = \sqrt{2(g + \frac{4\pi^2}{T^2} A)h} = 1,5 \text{ м/с};$$

$$v_{\min} = \sqrt{2(g - \frac{4\pi^2}{T^2} A)h} = 1,3 \text{ м/с}.$$

$$5.15. F = \sqrt{2Q^2 / \rho S} = 14 \text{ Н}.$$

$$5.16. F = \frac{\pi r^2 \rho v^2}{2} = 63 \text{ Н}.$$

$$5.17. F = C_x \frac{\rho S v}{2} = 3,7 \text{ кН}.$$

$$5.18. N = \left[\mu mg + \frac{\rho(v_1 + v_2)^2 S}{2} \right] v_2 = 2,2 \text{ кВт}.$$

$$5.19. N = \frac{\rho S v^3}{2} = 140 \text{ кВт}.$$

$$5.20. 0,9 \text{ м}.$$

$$5.21. v = \sqrt{2\Delta p / (n^4 - 1)\rho} = 0,5 \text{ м/с}.$$

$$5.22. N = \frac{n \pi m}{t \rho} = 2,2 \text{ Вт}.$$

$$5.23. 60 \text{ кДж}.$$

$$5.24. \eta = 2r^2 g (\rho_{CT} - \rho_{ГЛ}) / 9v = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}.$$

$$5.25. r = \sqrt[4]{8l\eta v / \pi \rho g h t} = 1,4 \text{ см}.$$

$$5.26. 4,9 \text{ Н}.$$

$$5.27. 0,15 \text{ м/с}; 3,3 \text{ м/с}.$$

$$5.28. r = \sqrt[3]{\frac{9\eta^2 R_0}{4g\rho_{\text{ст}}(\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{рт}})}} = 1,4 \text{ мм.}$$

$$5.29. F \approx \rho \frac{GSM_3}{R_3 + h} = 470 \text{ мН, где } M_3, R_3 - \text{масса и радиус Земли, } G - \text{гравитационная постоянная.}$$

$$5.30. \rho = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) / (h_1 + h_2).$$

$$6.1. v = \sqrt{2gs \tan \alpha} = 20 \text{ м/с.}$$

$$6.2. a = g \tan \alpha = 5,7 \text{ м/с}^2.$$

6.3. В системе отсчета, связанной с наклонной плоскостью, к телу приложены 4 силы (рис. 5): сила тяжести $P = mg$, сила инерции $F_{\text{ин}} = ma$, реакция опоры наклонной плоскости N и сила трения $F_{\text{тр}} = \mu(F'_{\text{ин}} + P')$, где m — масса тела, a — ускорение наклонной плоскости. Наименьшее значение ускорения найдем из условия, что сумма проекций этих сил на направление, параллельное наклонной плоскости, равна нулю, т. е. $F'_{\text{ин}} = F_{\text{тр}} + P'$. Учитывая, что $F'_{\text{ин}} = ma \cos \alpha$, $P' = mg \sin \alpha$ и $F_{\text{тр}} = \mu(ma \sin \alpha + mg \cos \alpha)$, получим:

$$a = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)g / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha).$$

$$6.4. 1) \mu = \frac{g \sin \alpha - a \cos \alpha}{g \cos \alpha + a \sin \alpha} = 0,07; 2) \mu = \frac{a \cos \alpha + g \sin \alpha}{g \cos \alpha - a \sin \alpha} = 0,3.$$

$$6.5. s = \frac{a}{2}(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)t^2 = 0,57 \text{ м/с}^2.$$

$$6.6. \mu = \frac{\omega^2 R}{g} = 0,2.$$

$$6.7. 69^\circ 50'.$$

$$6.8. v = \sqrt{(R-l)g/\mu} = 15 \text{ м/с.}$$

$$6.9. v' = \frac{\omega}{2} \sqrt{l_1^2 - l_2^2} = 0,49 \text{ м/с.}$$

$$6.11. v = \omega R^2 / s = 20 \text{ м/с.}$$

$$6.12. F = 380 \text{ Н.}$$

$$6.13. \Delta F = 4\pi v \omega_0, \text{ где } \omega_0 - \text{угловая скорость вращения Земли.}$$

$$6.14. s = \frac{2}{3} \omega_0 h \sqrt{\frac{2h}{g}} \cos \varphi = 3 \text{ см.}$$

$$6.15. s = \frac{4}{3} \omega \frac{v_0^3}{g^2} \cos \varphi = 4 \text{ м.}$$

$$6.16. 2^\circ 10'.$$

7.1. Обратные преобразования Лоренца можно получить согласно принципу относительности или решить систему уравнений преобразования Лоренца относительно нештрихованных величин:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; y = y', z = z'; t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

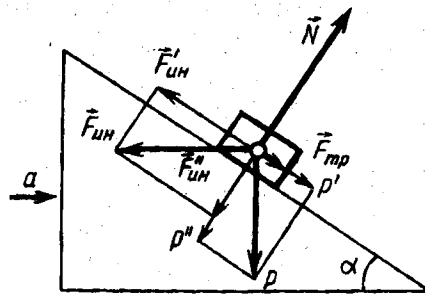


Рис. 5

$$7.2. l_1 = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \text{ и } l_0 = l_2 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \text{ откуда } l_0 = \sqrt{l_1 l_2} = 4,24 \text{ м, } v = c \sqrt{1 - l_1/l_2} = 212 \text{ Мм/с.}$$

$$7.3. \Delta D = D_0(1 - \sqrt{1 - v^2/c^2}) \approx 12,7 \text{ см, где } D_0 - \text{средний диаметр Земли.}$$

7.4. Время течет в самолете медленнее на 5 десятиллиардных долей процента. Это соответствует отставанию часов примерно на 1 с за 10 000 лет.

$$7.5. \text{На } 69,4 \text{ года.}$$

$$7.7. \text{Пусть } u'_y = u'_z = 0, u'_x = c. \text{ Тогда } u_x = c, u_y = 0, u_z = 0.$$

$$7.8. u_x = \frac{c+v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c.$$

7.9. Скорости u'_x , v и u_x одинаково направлены вдоль одной прямой. Тогда $u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \approx 2,93 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$

$$7.10. 0,5 \text{ с.}$$

$$7.11. (ct_{12})^2 - (\Delta x)^2 = (ct'_{12})^2 - (\Delta x')^2; \Delta x' = 0;$$

$$t_{12} = \sqrt{(t'_{12})^2 + (\Delta x/c)^2} \approx \sqrt{25 + 400} = 20,6 \text{ года; } 30 + 20,6 = 50,6 \text{ года.}$$

$$7.12. \text{В } 22,4 \text{ раза.}$$

$$7.13. \text{В } 1,2 \text{ раза.}$$

$$7.14. 299,97 \text{ Мм/с.}$$

$$7.15. \text{В } 1,8 \text{ раза.}$$

$$7.16. E_k^{\text{эл}} = 114 \text{ кэВ; } E_k^{\text{рел}} = 175 \text{ кэВ.}$$

$$7.17. 0,15; 1,58 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

$$7.18. 298 \text{ Мм/с.}$$

$$7.19. 1,11 \cdot 10^{-17} \text{ кг.}$$

7.20. При малых скоростях движения $(v/c) \ll 1$. Тогда

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \text{ и } E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) = m_0 v^2 / 2.$$

$$8.1. 0,04.$$

$$8.2. F = ESd(t - t_0) = 2,5 \text{ кН.}$$

$$8.3. d = d_0 \left(1 - \mu \frac{\Delta l}{l} \right) = 5 \text{ мм.}$$

$$8.4. \frac{\Delta V}{V} = \frac{4F(1 - 2\mu)}{\pi E d^2} = 0,001.$$

$$8.5. l = p_m / \rho g = 9 \text{ км.}$$

$$8.6. 0,5.$$

$$8.7. a = (p_m - \rho g l) / \rho l.$$

$$8.8. \varepsilon_l = \rho l (g + a) / E.$$

$$8.9. \mu = \frac{\Psi}{2\varepsilon_l} - 1 = 0,35.$$

$$8.10. d = 2 \sqrt[4]{2Ml / \pi G \varphi} = 3 \text{ мкм.}$$

$$8.11. \varepsilon_l = \sqrt{2A/ESl} = 0,001.$$

$$8.12. w = E\varepsilon_l^2/2 = 100 \text{ кДж/м}^3.$$

$$8.13. x = v\sqrt{mx_0/2F} = 0,1 \text{ м.}$$

$$8.14. F = mg(1 + \sqrt{2h/x_0 + 1}) = 6,5 \text{ кН.}$$

$$8.15. F = mgs/x = 88 \text{ Н.}$$

$$8.16. h = ES\Delta l^2/2mgl = 36 \text{ м.}$$

$$8.17. 1,8.$$

$$8.18. x = \frac{m}{k} [g + \sqrt{a(2g - a)}].$$

$$9.1. E_p = 15 \text{ мкДж}; E_k = 47 \text{ мкДж}; E = 62 \text{ мкДж.}$$

$$9.2. 9,8 \text{ г}; 0,02 \text{ с.}$$

$$9.3. A = \frac{E}{F} = 0,02 \text{ м.}$$

$$9.4. \text{В } 10^8 \text{ раз.}$$

$$9.5. \beta = \frac{1}{2} \ln \frac{A_0}{A} = 0,3 \text{ с}^{-1}.$$

$$9.7. \text{Замедлится в } 1,003 \text{ раза.}$$

$$9.8. n = \frac{T_1}{T_2} = \sqrt[4]{1 + \left(\frac{a}{g}\right)^2}.$$

$$9.9. k = 4\pi^2 m v^2 = 200 \text{ Н/м.}$$

$$9.10. T = 2\pi\sqrt{\Delta x/g} = 0,28 \text{ с.}$$

$$9.11. v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{A}} = 0,7 \text{ Гц.}$$

$$9.12. v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h} \cdot \frac{\sin \beta \sin(\alpha - \beta)}{\sin \beta + \sin(\alpha - \beta)}} = 0,23 \text{ с}^{-1}.$$

$$9.13. T = 2\pi\sqrt{(m_1 + m_2)/Sg\rho} = 0,9 \text{ с.}$$

$$9.14. v = \sqrt{4km - r^2/4\pi m} = 2,5 \text{ Гц.}$$

$$9.15. v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3g(l-2d)}{2(l^2-3ld+3d^2)}} = 0,92 \text{ Гц.}$$

$$9.16. T = 2\pi \sqrt{[m + 3(m_1 + m_2)]l/6g(m_2 - m_1)} = 3 \text{ с.}$$

$$9.17. T = 2\pi \sqrt{2l/3(g+a)} = 1,1 \text{ с.}$$

$$9.18. v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2g/3R} = 1,3 \text{ Гц.}$$

$$9.19. T = 2\pi \sqrt{ml/4Mg} = 0,16 \text{ с.}$$

$$9.20. T = 4\pi \frac{R^2}{r^2} \sqrt{\frac{\rho l R}{15G}} = 3,2 \text{ с.}$$

$$9.21. 0,03 \text{ м.}$$

$$9.22. T = 2\pi \sqrt{\rho h/\delta g} = 180 \text{ с.}$$

$$9.23. T = 2\pi \sqrt{m_1 m_2 / (m_1 + m_2) k}.$$

$$9.24. \text{Тело достигнет точки } B \text{ быстрее в том случае, когда будет скользить по поверхности сферы.}$$

$$9.25. \text{Поочередно подвесить грузы на пружине, определить периоды их колебаний и определить неизвестную массу по формуле: } m_1 = m_2 \frac{T_1^2}{T_2^2}.$$

$$9.26. 340 \text{ м/с}; 0,4 \text{ м/с.}$$

$$9.27. 0,11 \text{ м.}$$

$$9.28. 1,5 \text{ м/с.}$$

$$9.29. \text{В } 1,5 \text{ раза.}$$

$$9.30. 1600 \text{ м/с.}$$

$$9.31. 1160 \text{ м/с.}$$

$$9.32. 1400 \text{ м/с.}$$

$$9.33. k = \frac{4\rho h^2}{t^2} = 2,1 \text{ ГПа.}$$

$$9.34. F = \pi \rho l^2 d^2 v^2 = 45 \text{ Н.}$$

$$9.35. v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}} = 129 \text{ м/с.}$$

$$9.36. v = \sqrt{Fl/m} = 200 \text{ м/с.}$$

$$9.37. \Delta v = v - \frac{1}{ld} \sqrt{F/\pi \rho} = 1,3 \text{ Гц.}$$

$$9.38. 5700 \text{ м/с.}$$

$$9.39. v = v/2l = 170 \text{ Гц.}$$

$$9.40. v = v/4l = 250 \text{ Гц.}$$

$$9.41. 10^8; 1 \text{ Вт/м}^2; 10 \text{ нВт/м}^2.$$

$$9.42. 140 \text{ дБ.}$$

$$9.43. \Delta v = 2v/(c-v) = 0,42 \text{ кГц.}$$

$$9.44. v' = [(c+v_1)/(c-v_2)]^2 v = 51 \text{ кГц.}$$

$$9.45. v'_1 = v(c+v_1)/(c-v_1) = 560 \text{ Гц}; v'_2 = v(c-v_1)/(c+v_2) = 443 \text{ Гц};$$

$$v'_2 = v(c+v_2)/(c-v_2) = 564 \text{ Гц}; v'_2 = v(c-v_2)/(c+v_2) = 446 \text{ Гц.}$$

$$9.46. u = v(\tau_0 - \tau)/(\tau_0 + \tau).$$

$$10.1. 570 \text{ км.}$$

$$10.2. h = \sqrt[3]{gR_3^2 T^2 / 2\pi^2} - R_3 = 35,8 \text{ Мм.}$$

$$10.3. v = \sqrt{2GM_\pi/R_\pi} = 2,4 \text{ км/с.}$$

$$10.4. 10^3 \text{ м/с.}$$

$$10.5. x = 54 \text{ м}; R_3 = 344 \text{ Мм.}$$

$$10.6. v = \sqrt{GM_c/r} = 29,8 \text{ км/с.}$$

$$10.7. \rho = 3g/4\pi GR_3 = 5500 \text{ кг/м}^3.$$

$$10.8. M_3 = 4\pi^2(R_3 + h)^3/GT^2 = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

$$10.9. v = \sqrt{GM_3/r} = 1,02 \text{ км/с.}$$

$$10.10. v = \sqrt{2GM_3/R_3} = 11,2 \text{ км/с. Указание: воспользоваться законом сохранения энергии.}$$

$$10.11. \text{На } 0,002 \text{ ее массы на уровне моря.}$$

10.12. $h=0,41$ $R_3=2,6$ Мм.

10.13. 60 мкм/с².

10.14. 197 Гм.

10.15. $v = \frac{2v_{cp}r^2}{r_1+r_2} = 30,3$ км/с.

10.16. $A = mg\Gamma_3 = 310$ ГДж.

10.17. Нет. При запуске спутника на орбиту большего радиуса его кинетическая энергия уменьшается, но увеличивается потенциальная энергия, и суммарная работа, требуемая для запуска спутника, растет.

10.18. $p = \frac{2}{3}\pi G\rho^2 R^2$.

11.1. $5 \cdot 10^{12}$ атомов.

11.2. На $1,9 \cdot 10^{19}$ молекул.

11.3. $2,3 \cdot 10^{22}$ частиц.

11.4. $3,3 \cdot 10^{19}$ атомов.

11.5. $l = \sqrt[3]{\frac{NkT}{p}} = 0,33$ мкм.

11.6. $\Delta n = -1,22 \cdot 10^{25}$ молекул/м³.

11.7. $\Delta p = -4$ кПа.

11.8. $9,8$ кПа.

11.9. $N_1 = N \frac{1}{1 + \frac{l}{\tau} \sqrt{\frac{M}{3RT}}} = 0,98N$.

11.10. $\tau = 6 \frac{\Delta p V}{p S} \sqrt{\frac{M}{3RT}} = 2$ мин.

11.11. Если $n_{O_2} = n_{He}$,

то $\frac{N_{O_2}}{N_{He}} = \sqrt{\frac{M_{He}}{M_{O_2}}} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$,

а если $m_{O_2} = m_{He}$,

то $\frac{N_{O_2}}{N_{He}} = \sqrt{\frac{M_{He}}{M_{O_2}}} \cdot \frac{M_{He}}{M_{O_2}} = \frac{1}{16\sqrt{2}}$.

11.12. $2,4$ МДж.

11.13. $1,5$ кДж; $0,6$; $0,4$.

11.14. $1,5$ кДж.

11.15. $8,2$ кДж.

11.16. $\langle \epsilon \rangle = 3(N-1)kT = 1,24 \cdot 10^{-19}$ Дж; $\frac{\langle \epsilon_n \rangle}{\langle \epsilon \rangle} = \frac{1}{2(N-1)} = \frac{1}{6}$, где

N — число атомов в молекуле.

11.17. $T_{\max} = T + \frac{Mv^2}{5R} = 335$ К.

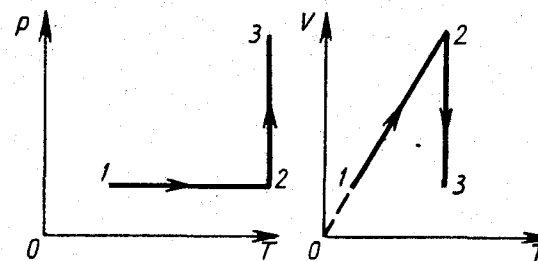


Рис. 6

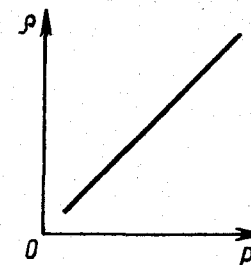


Рис. 7

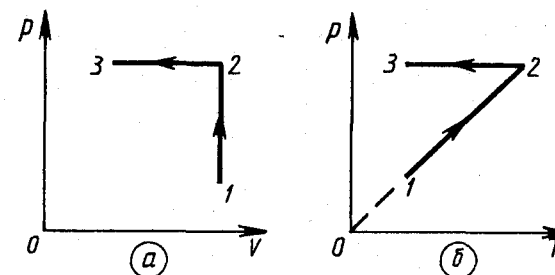
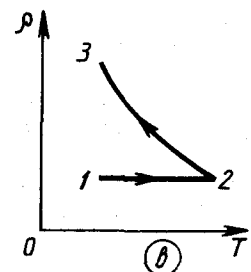


Рис. 8



11.18. См. рис. 6.

11.19. См. рис. 7.

11.20. См. рис. 8.

11.21. См. рис. 9.

11.22. См. рис. 10.

11.23. $M_1 > M_2$;
 $m_1 < m_2$.

11.24. См. рис. 11.

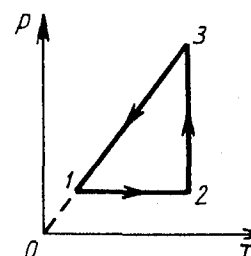
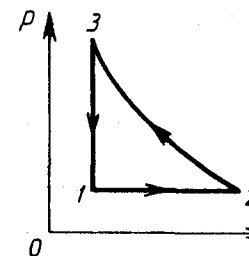


Рис. 9

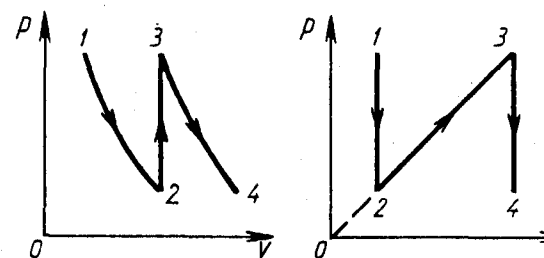


Рис. 10

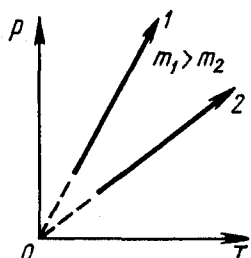


Рис. 11

$$11.25. \Delta p > 0; \Delta V < 0; \Delta T > 0.$$

$$11.26. 0,15 \text{ см}^3.$$

$$11.27. h = \frac{2p_0}{\rho g} = 20,6 \text{ м.}$$

$$11.28. 625 \text{ К.}$$

$$11.29. 300 \text{ К.}$$

$$11.30. 0,10 \text{ дм}^3.$$

$$11.31. n = \frac{4V}{V_0} = 50.$$

$$11.32. n = \ln k / \ln[(V_0 + V)/V_0] = 71.$$

$$11.33. 5 \text{ дм}^3.$$

$$11.34. \frac{V_2}{V_1} = \frac{\mu mg \cos \alpha}{pS} + \sqrt{\left(\frac{\mu mg \cos \alpha}{pS}\right)^2 + 1} = 1,2.$$

$$11.35. \text{Барометр будет давать правильные показания.}$$

$$11.36. 99,8 \text{ кПа.}$$

$$11.37. h = h_0 \frac{T}{T_0} \cdot \frac{l_0}{l_0 + \frac{1}{2}(h - h_0)}. \text{ Если } \frac{1}{2}(h - h_0) \ll l_0,$$

$$\text{то } h \approx h_0 \frac{T}{T_0} = 13 \text{ см.}$$

$$11.38. \text{В } 10 \text{ раз.}$$

$$11.39. \Delta m = \frac{MV}{RT} \Delta p = 94 \text{ г.}$$

$$11.40. 0,43 \text{ кг.}$$

$$11.41. 0,028 \text{ кг/моль.}$$

$$11.42. \rho = \frac{M(p_0 - p)}{R} = 17 \text{ г/м}^3.$$

$$11.43. 1,2 \text{ МПа.}$$

$$11.44. 0,040 \text{ кг/моль.}$$

$$11.45. 0,029 \text{ кг/моль.}$$

$$11.46. 1,2 \text{ м}^3.$$

$$11.47. 24 \text{ г; } 40 \text{ г.}$$

$$11.48. \rho = \frac{p}{RT} \cdot \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}} = 0,24 \text{ кг/м}^3.$$

$$11.49. 0,53 \text{ кг/м}^3.$$

$$11.50. 37 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

$$11.51. \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{6 \langle E \rangle}{im}} = 0,40 \text{ км/с.}$$

$$11.52. 0,35 \text{ мм/с; } 0,32 \text{ мм/с.}$$

$$11.53. \text{В } 3 \text{ раза.}$$

$$11.54. 1000 \text{ К.}$$

$$11.55. 0,2 \text{ км/с.}$$

$$11.56. 0,60 \text{ км/с.}$$

$$11.57. 0,42 \text{ км/с.}$$

$$11.58. 550 \text{ м/с.}$$

$$11.59. 645 \text{ м/с; } 1,29 \text{ км/с.}$$

$$11.61. 1,9\%.$$

$$11.62. 4,4\%; 3\%.$$

$$11.63. 1,07.$$

$$11.64. 5,53 \text{ км.}$$

$$11.65. 94,6 \text{ кПа.}$$

$$11.66. 1 \text{ км.}$$

$$11.67. 79 \text{ кПа; } 2,0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$11.68. 4,2 \text{ мм.}$$

$$11.69. 123 \text{ км.}$$

$$12.1. 64 \text{ Тм.}$$

$$12.2. 0,4 \text{ мкм.}$$

$$12.3. 4,7 \text{ Мм.}$$

$$12.4. \langle \lambda \rangle = \frac{MV}{\sqrt{2\pi d^2 m N_A}} = 0,21 \text{ мкм.}$$

$$12.5. \rho = \frac{M}{\sqrt{2\pi d^2 \langle \lambda \rangle N_A}} = 14 \text{ мг/м}^3.$$

$$12.6. \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3\sqrt{2\pi N_A d^2 p \langle \lambda \rangle}}{M}} = 0,41 \text{ км/с.}$$

$$12.7. 94,8 \text{ мПа.}$$

$$12.8. \text{Вакуум высокий, так как } \langle \lambda \rangle \gg l (76 \text{ м} \gg 0,5 \text{ м}).$$

$$12.9. p \leq 23,8 \text{ мПа.}$$

$$12.10. \rho \leq \frac{M}{\sqrt{2\pi d^2 N_A}} \sqrt{\frac{\pi}{6V}} = 94 \text{ мкг/м}^3.$$

$$12.11. \langle \tau \rangle = \frac{1}{4d^2 p} \sqrt{\frac{MkT}{\pi N_A}} = 0,83 \text{ мкс.}$$

$$12.12. \langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda_1 \rangle p_1}{2p_2 T_1} \sqrt{\frac{\pi M T_2}{2R}} = 20 \text{ мс.}$$

$$12.13. \langle z \rangle = 4d^2 p \sqrt{\frac{\pi N_A}{MkT}} = 4,7 \text{ Гс}^{-1}.$$

$$12.14. \langle z \rangle = \frac{2 \langle v_{\text{кв}} \rangle}{\langle \lambda \rangle} \sqrt{\frac{2}{3\pi}} = 0,20 \text{ Гс}^{-1}.$$

$$12.15. \langle z \rangle = \frac{p_2}{\langle \lambda_1 \rangle p_1} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 59 \text{ Гс}^{-1}.$$

$$12.16. \langle z \rangle = \frac{V_1}{\langle \lambda_1 \rangle V_2} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 23 \text{ Гс}^{-1}.$$

$$12.17. z = 2V \left(\frac{pd}{kT} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi RT}{M}} = 2,6 \cdot 10^{32} \text{ с}^{-1}.$$

$$12.18. z_0 = p \sqrt{\frac{N_A}{2\pi m k T}} = 3,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

12.19. Увеличится: 1) в 4 раза; 2) в 2 раза.

12.20. 92 мм²/с.

12.21. 14 мм²/с.

12.22. 89 мм²/с.

12.23. 15,4 мм²/с.

12.24. Увеличится в 2 раза.

12.25. 20 мкПа·с.

12.26. 14 мм²/с; 17 мкПа·с.

12.27. 0,19 нм.

12.28. 20,1 мкПа·с.

12.29. 69 К.

12.30. $p \geq 2 \text{ Па}$.

$$12.31. \kappa = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M} \eta = 3,78 \text{ мВт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

$$12.32. \kappa = \frac{ik}{3\pi d^2} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}} = 7 \text{ мВт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

$$12.33. n = \frac{2\kappa}{iDk} = 3,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$12.34. p \leq \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 l}} = 1,7 \text{ Па}.$$

- 13.1. а) $C_V = 3/2R$, $C_p = 5/2R$, $\gamma = 1,67$;
 б) $C_V = 5/2R$, $C_p = 7/2R$, $\gamma = 1,40$;
 в) $C_V = 7/2R$, $C_p = 9/2R$, $\gamma = 1,29$;
 г) $C_V = 3R$, $C_p = 4R$, $\gamma = 1,33$;
 д) $C_V = 6R$, $C_p = 7R$, $\gamma = 1,17$.

13.2. 5.

13.3. 0,032 кг/моль.

$$13.4. c_p = \frac{\gamma p}{(\gamma - 1)\rho T} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_v = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho T} = 0,74 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

13.5. 1,38.

13.6. 2 моль.

13.7. $c_p = 1,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_v = 1,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

13.8. 1,2 кДж/(кг·К).

13.9. 1,0 кДж/(кг·К); 0,72 кДж/(кг·К).

13.10. 1,4.

13.11. 1) $C = C_V + \frac{R}{2}$; 2) $C = C_V - R$.

13.12. 0,40 кДж.

13.13. 0,004 кг/моль.

$$13.14. Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot p V_1 \left(\frac{V_2}{V_1} - 1 \right) = 4,8 \text{ кДж}.$$

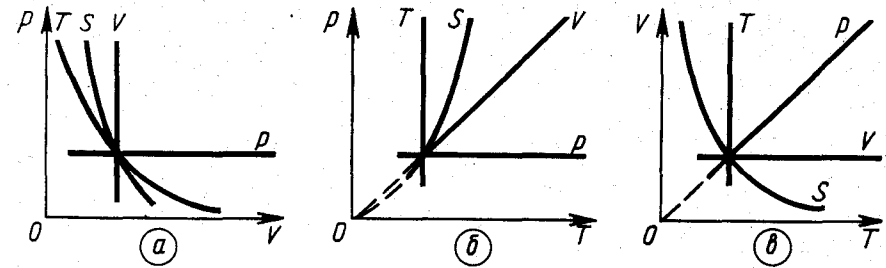


Рис. 12

13.15. 586 К; 4,6 МПа.

13.16. 7,5 кДж.

$$13.17. \Delta F = \frac{\pi Q d^2 (\gamma - 1)}{4V} = 53 \text{ Н}.$$

13.18. См. рис. 12.

13.19. 382 К.

13.20. $\approx 180 \text{ К}$.

13.21. $A'_p > A'_T > A'_S$, где A'_S — работа, совершаемая газом при адиабатном процессе.

13.22. $A_S > A_T > A_p$.

13.23. 0,33 кДж.

13.24. 0,6 кДж.

13.25. 1) 980 Дж; 2) 245 Дж.

13.26. -0,19 МДж; -0,68 МДж.

13.27. 1 и 2 — растет, 3 — постоянна, 4 и 5 — убывает.

13.28. См. рис. 13.

13.29. $A'_1 > A'_2$; $\Delta U_1 = \Delta U_2$; $Q_1 > Q_2$.

13.30. $A'_1 > 0$; $A'_2 < 0$.

13.31. 520 Дж; 312 Дж; 208 Дж.

13.32. 3/5; 2/5; 5/7; 2/7; 3/4; 1/4.

13.33. 1,5 кДж; 2,25 кДж.

$$13.34. \Delta V = \frac{2\Delta U}{i p} = 8 \text{ дм}^3.$$

13.35. 977 К; 5,4 МПа; $A' = -\Delta U = -1,5 \text{ кДж}$.

13.36. 2,3 м³.

$$13.37. \Delta U = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} = 1,3 \text{ кДж}.$$

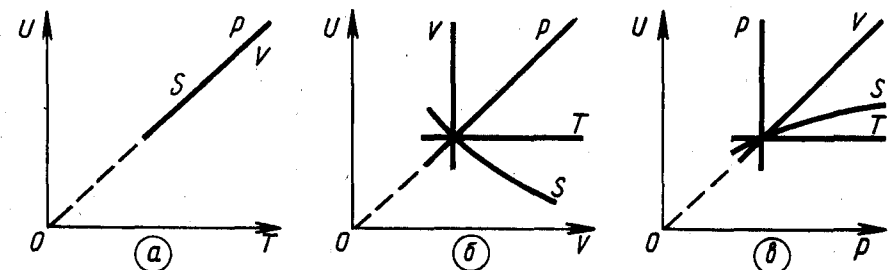


Рис. 13

$$13.38. T = \frac{M(p_2 V_1 - p_1 V_2)}{4(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)mR} = 496 \text{ К.}$$

$$13.39. A'_{12} > 0, Q_{12} > 0; A'_{21} < 0, Q_{21} < 0.$$

$$13.40. 1) V_1/V_2 = 2; 2) T_2 = 222 \text{ К}; 3) Q = 148 \text{ Дж};$$

$$4) p_3 = 0,5 \text{ МПа.}$$

$$13.41. 0,84 \text{ МДж.}$$

$$13.42. T_2 = 313 \text{ К}; V_2 = 45 \text{ дм}^3; T_1 = 519 \text{ К}; V_1 = 74 \text{ дм}^3.$$

$$13.43. \text{См. рис. 14.}$$

$$13.44. \text{См. рис. 15}; A'_{12} > 0; A'_{21} > 0, A'_{31} < 0, A'_{41} < 0.$$

$$13.45. \text{См. рис. 16}; \Delta U_{12} = 0, \Delta U_{31} = 0, \Delta U_{24} < 0, \Delta U_{41} > 0.$$

$$13.46. Q_1 = Q - (p_2 - p_1)(V_2 - V_1).$$

$$13.47. 1) Q = 36 \text{ кДж}, \Delta U = 30 \text{ кДж}, A' = 6 \text{ кДж};$$

$$2) Q = 34 \text{ кДж}, \Delta U = 30 \text{ кДж}, A' = 4 \text{ кДж};$$

$$3) Q = 32 \text{ кДж}, \Delta U = 30 \text{ кДж}, A' = 2 \text{ кДж}.$$

$$13.48. A' = 0; A' = 21 \text{ кДж}; A = -15 \text{ кДж}.$$

$$13.49. T_{\max} = T \left[1 + \frac{mghR}{M(p_0 + p)VC_1} \right] = 306 \text{ К.}$$

$$13.50. T = \frac{3}{5}T_0 + \frac{2}{5} \frac{p_0 + \frac{mg}{S}}{\gamma R}; V = \frac{2}{5}V_0 + \frac{3}{5} \frac{\gamma RT_0}{p_0 + \frac{mg}{S}}.$$

$$13.51. T_2 = T_1 \frac{1}{1 + \frac{R}{4C_V}}; p_2 = \frac{p_1}{2 \left(1 + \frac{R}{4C_V} \right)}.$$

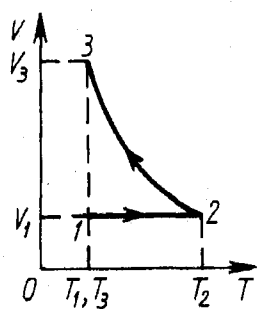


Рис. 14

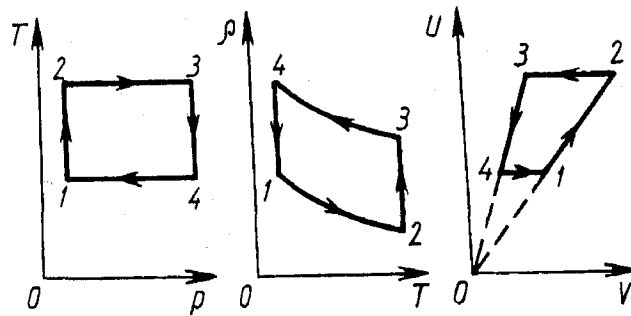


Рис. 15

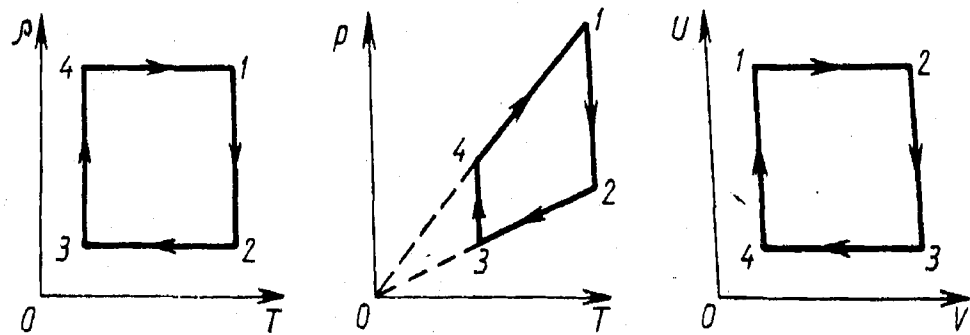


Рис. 16

$$13.52. 482 \text{ К.}$$

$$13.53. 30 \text{ м/с.}$$

$$13.54. 1,16; \approx -3,75 \text{ МДж.}$$

$$13.55. 595 \text{ К}; 0,62 \text{ МДж.}$$

$$13.56. 1) C = -21 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

$$2) Q = 21 \text{ Дж.}$$

$$3) A = 42 \text{ Дж.}$$

$$13.57. 1) n = -1; 2) C = \frac{R}{2} \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma-1}; 3) \Delta U = \frac{24pV}{\gamma-1};$$

$$4) A' = 12p_1V_1.$$

$$13.58. 767 \text{ м/с.}$$

$$13.59. 398 \text{ К.}$$

$$13.60. T = \frac{(\gamma-1)v^2 M}{2\gamma R} = 4,54 \text{ кК.}$$

$$13.61. v = v_r \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}}, \text{ где } v_r = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}.$$

$$13.62. T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 119 \text{ К};$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{RT_1}{M} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} = 1,37 \text{ км/с.}$$

$$13.63. \frac{m_0}{m} = e^{\frac{v_1}{2\gamma} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot \frac{M}{RT}} = 12,6.$$

$$13.64. 3,5 \text{ кК}; 74\%.$$

$$13.65. T_{\max} \text{ будет в критической точке, в которой } v = 0;$$

$$T_{\max} = T \left(1 + \frac{\gamma-1}{2\gamma} \cdot \frac{Mc^2}{RT} \right).$$

$$13.66. F = \rho v^2 S + pS = \frac{81m^2 RT}{\rho SM} + pS = \frac{81m^2 RT}{\rho SM}, \text{ где } M - \text{молярная}$$

масса водяного пара, ρ — плотность пара. Второй член в выражении для силы тяги мал по сравнению с первым и им при расчетах можно пренебречь, так как мало давление p газа, выходящего из сопла.

$$13.67. 0,907 \text{ МН.}$$

$$14.1. \eta_{1'-2'-3-4-1'} > \eta_{1-2-3-4-1}.$$

$$14.2. \eta_{1-2-3'-4'-1} > \eta_{1-2-3-4-1}.$$

$$14.3. 19\%.$$

$$14.4. 364 \text{ К.}$$

$$14.5. 1/3.$$

$$14.6. \text{В 2 раза.}$$

$$14.7. \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{T_1}{T_2} = 1,4.$$

14.8. 0,26 МВт.

14.9. $\varepsilon = \frac{1-\eta}{\eta} = 4$.

14.10. 7,6 кДж.

14.11. 1,06 МДж.

14.12. $Q = P\tau + c\rho\tau + \lambda\rho\tau$, где ρ — плотность воды, c — удельная теплоемкость воды, λ — удельная теплота плавления льда.

14.13. $Q = P(1+\varepsilon)t = 35$ МДж.

14.14. 5%.

14.15. 24%.

14.16. 95 дм³.

14.17. -0,18 кДж.

14.18. Построим диаграммы процессов 1-2-3-1 и 1-3-4-1 в координатах p, V . Из рисунка 17 видно, что площадь фигуры, ограниченной графиком цикла 1-2-3-1, больше площади фигуры, ограниченной графиком цикла 1-3-4-1. Это означает, что большую работу газ совершает в процессе 1-2-3-1.

14.19. 83 кДж.

14.20. $\eta_1/\eta_2 = 0,7$.

14.21. $A = R(T_1 + T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3})$.

14.22. 17%.

14.23. 1) $T_1 = 335$ К, $T_2 = 391$ К, $T_4 = 362$ К,
 $V_2 = 86$ дм³;

2) $A' = 1,28$ кДж;

3) $Q_1 = 72,1$ кДж;

4) $\eta = 2\%$;

5) $\eta_K = 21\%$.

14.24. $\eta = \frac{\ln(p_2/p_1) - (1-p_1/p_2)}{\ln(p_2/p_1) + (1-p_1/p_2)/(\gamma-1)} = 9\%$.

14.25. $\eta = 1 - \frac{\gamma \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\gamma} - 1 \right]}{\frac{p_2}{p_1} - 1} = 9\%$.

14.26. $n_1 > n_2$ и $\eta_1 > \eta_2$, где $n_1 = \frac{V_1}{V_2}$, $n_2 = \frac{V_1}{V_5}$, η_1 — КПД цикла 1-2-3-4-1, η_2 — КПД цикла 1-5-6-7-1.

14.27. $\eta = 1 - \frac{1}{n^{\gamma-1}}$.

14.28. 45%.

14.29. $\eta_{II} > \eta_I$.

14.30. $\eta = 1 - \frac{k^{\gamma}-1}{\gamma n^{\gamma-1}(k-1)}$.

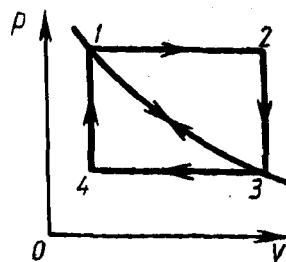


Рис. 17

14.31. $\eta = 1 - \frac{1}{\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$.

14.32. $\eta = 1/12$.

14.33. 302 К.

14.34. 1) 1,7 Дж/К; 2) 2,9 Дж/К.

14.35. 29 Дж/К.

14.36. При изотермическом сжатии температура не изменяется, а при адиабатном она увеличивается в $2^{\gamma-1}$ раз. Для обратимых процессов при адиабатном сжатии энтропия не меняется ($S_1 = S_2$), а при изотермическом она убывает ($S_2 < S_1$).

14.37. На диаграмме S, T цикл Карно изобразится в виде прямоугольника 1-2-3-4 (рис. 18), где 1-2 и 3-4 — изотермы, 2-3 и 4-1 — адиабаты.

14.38. 89 дм³.

14.39. $\frac{\Delta S_H}{\Delta S_O} = 16$.

14.40. -0,20 кДж/К.

14.41. $\Delta S = (C_p - nC_v) \ln \frac{V_2}{V_1}$.

14.43. 90 Дж/К.

14.44. 0,29 кДж/К.

14.45. 0,77 кДж/К.

14.46. 1,6 Дж/К.

14.47. 1,5 кДж/К.

14.48. $\ln \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = 4,2 \cdot 10^{23}$; $\frac{p_1}{p_2} = 2$.

14.49. $1,00 \cdot 10^{1020}$.

15.1. 301 К; 307 К.

15.2. 5,2 МПа.

15.3. $p_i = \frac{ap^2}{M^2} = 1,7$ ГПа.

15.4. $d = \sqrt[3]{\frac{3b}{2\pi N_A}} = 290$ пм.

15.5. 2,5 МПа; 0,18 МПа; 0,25 дм³.

15.6. $A = -\frac{m^2 a}{M^2} \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) = 1,7$ Дж.

15.7. 1,92 Н·м⁴/моль²; 0,12 дм³/моль.

15.8. 200 кг/м³.

15.9. 25 кг/м³.

15.10. 56,8 МПа.

15.11. 5,9 г.

15.12. 94,7 см³.

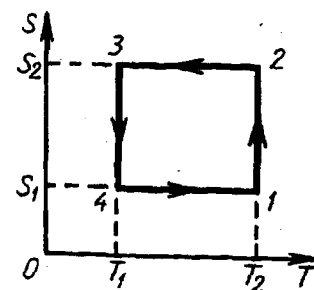


Рис. 18

$$15.13. d = \sqrt[3]{\frac{3kT_k}{16\pi p_k}} = 293 \text{ пм.}$$

$$15.14. \lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi p}} \left(\sqrt[3]{\frac{2}{3} \frac{\pi N_A}{b}} \right)^2 = 84 \text{ нм.}$$

$$15.15. 97,5 \text{ нм.}$$

$$15.16. 36 \text{ мм}^2/\text{с.}$$

$$15.17. \tau = T/T_k = 1,5.$$

$$15.18. 2,6 \cdot 10^{25} \text{ молекул.}$$

$$15.19. 2,5 \text{ г.}$$

$$15.20. 1,2 \text{ кг.}$$

$$15.21. \text{ Уменьшится на } 66\%.$$

$$15.22. \text{ CCl}_4 \text{ при «пограничном» кипении испаряется в } 25 \text{ раз быстрее воды.}$$

$$15.23. 84,6 \text{ кПа.}$$

$$15.24. 42 \text{ К.}$$

$$15.25. T_2 = \frac{T_1}{1 - \frac{T_1 R}{\lambda M} \ln \frac{p_2}{p_1}} = 375 \text{ К.}$$

$$15.26. 3,3 \cdot 10^{28} \text{ молекул; } 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

$$15.27. 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3; 310 \text{ пм.}$$

$$15.28. 96 \text{ пН.}$$

$$15.29. 73 \text{ мН/м.}$$

$$15.30. 0,54 \text{ мДж.}$$

$$15.31. 7,8 \text{ Мг/м}^3.$$

$$15.32. 0,1 \text{ м; } 1,5 \text{ м.}$$

$$15.33. A = \frac{6\sigma m}{\rho d} = 2,2 \text{ Дж.}$$

$$15.34. Q = 192\pi r^2 \sigma = 1,2 \text{ мДж.}$$

$$15.35. 4,1 \text{ см.}$$

$$15.36. 3 \text{ см; } 1,5 \text{ см.}$$

$$15.37. 64 \text{ мН/м.}$$

$$15.38. 15 \text{ см.}$$

$$15.39. 37,5 \text{ мкм.}$$

$$15.40. a = g = 9,81 \text{ м/с.}$$

$$15.41. \text{ Во внутреннем капилляре в } 4/3 \text{ раза выше, чем во внешнем.}$$

$$15.42. D = \sqrt[3]{\frac{6\sigma d}{\rho g}} = 1,6 \text{ мм.}$$

$$15.43. \sigma = \frac{\rho g d h}{4n} = 0,78 \text{ Н/м.}$$

$$15.44. m = \frac{\sigma \pi d}{g} = 28 \text{ мг.}$$

$$15.45. m < 23 \text{ мг; } m = 23 \text{ мг; } m > 23 \text{ мг.}$$

$$15.46. R_1 = \frac{d}{2} = 0,5 \text{ мм; } 1) R_2 = \frac{\sigma \pi d^2}{2(\sigma \pi d - mg)} = 2,2 \text{ мм;}$$

$$2) R_2 = \infty; 3) R_2 = \frac{\sigma \pi d^2}{2(mg - \sigma \pi d)} = 1,1 \text{ мм.}$$

$$15.47. l \leq 4,35 \text{ см.}$$

$$15.48. h \geq 2,8 \text{ см.}$$

$$15.49. \sigma = \frac{g(\pi d^2 l \rho - 4m)}{8\pi d} = 33 \text{ мН/м.}$$

$$15.50. h = \frac{4(mg + \sigma \pi d)}{\rho g \pi d^2} = 3,8 \text{ см.}$$

$$15.51. 0,45 \text{ г.}$$

$$15.52. \rho = \frac{2\sigma}{ghd} = 0,85 \text{ Мг/м}^3.$$

$$15.53. F = \frac{\sigma m}{\rho d} \left(\sqrt{\frac{\pi \rho d}{m}} + \frac{2}{d} \right) = 10 \text{ Н.}$$

$$15.54. h = \frac{p}{\rho g} - \frac{4\sigma}{\rho g d} = 749 \text{ мм; } d = \frac{4\sigma}{\Delta p} = 2,2 \text{ см.}$$

$$15.55. p = \Delta h + \frac{4\sigma}{\rho g d} = 101 \text{ кПа.}$$

$$15.56. \sigma = \frac{\rho g \Delta h}{4 \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)} = 73 \text{ мН/м.}$$

$$15.57. 0,5 \text{ Н/м.}$$

$$15.58. 750 \text{ кПа. Насос должен быть присоединен к узкому каналу манометра.}$$

$$15.59. 0,4 \text{ мкм.}$$

$$15.60. \Delta p = 36 \text{ Па; } \rho = \frac{M}{RT} \left(p_0 + \frac{8\sigma}{d} \right) = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

$$15.61. 2,3 \text{ мДж.}$$

$$15.62. 1 \text{ мВт.}$$

$$15.63. 1) \text{ Малый пузырек будет уменьшаться, а большой — увеличиваться; } 2) \Delta r = 0,8 \text{ см.}$$

$$15.64. 4,7 \text{ мДж.}$$

$$15.65. 1,0 \text{ мК}^{-1}.$$

$$15.66. \rho_2 = \frac{\rho_1}{1 - k \Delta p}.$$

$$15.67. 46 \text{ МПа.}$$

15.68. 3 мм/с.

15.69. 0,97 кг/(м·с).

15.70. $5 \cdot 10^{22}$ дм⁻³.

15.71. На 82 К.

15.72. 0,18 МПа.

15.73. 32%.

15.74. 1,7 м.

16.1. 1,4.

16.2. 17 мК⁻¹; 14°C.

16.3. $T = T_0 \sqrt{1 + \alpha t}$.

16.4. 12,6 кН.

16.5. 68 см³; 54 см³.

16.6. 100,7 кПа.

16.7. 925 Дж/(кг·К); 390 Дж/(кг·К); 128 Дж/(кг·К).

16.8. 670 Дж/(кг·К); 675 Дж/(кг·К).

16.9. 28 см.

16.10. 359 К.

16.11. 5,9 кг.

16.12. 473 К.

16.13. $Q = \frac{(t_1 - t_4)\tau S}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\kappa} + \frac{1}{\alpha_2}} = 30$ Дж;

$t_2 = t_1 - \frac{Q}{\alpha_1 \tau S} = 18^\circ\text{C};$

$t_3 = t_4 + \frac{Q}{\alpha_2 \tau S} = -15^\circ\text{C}.$

16.14. 1) $t = -2^\circ\text{C};$

2) $t = 19^\circ\text{C}$. Наивыгоднейший вариант 2; $\eta = 51\%$.

16.15. $Q = \frac{(t_1 - t_5)\tau S}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\kappa_1} + \frac{l_2}{\kappa_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = 26$ кДж.

16.16. $l = \lambda \left[\frac{(t_1 - t_5)\tau S}{Q} - \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\kappa_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right] = 0,63$ мм.

16.17. 5,3 МПа.

16.18. $-0,082^\circ\text{C}.$

16.19. -50 Дж/К.

16.20. 2,6 кДж/К.

16.21. 2,1 кДж/К.

16.22. -20 Дж/К.

16.23. $\Delta T = -0,8$ К; $\frac{\Delta m}{m} = 5 \cdot 10^{-3}.$

16.24. 0,13 МДж/кг.

17.1. $x = \frac{l\sqrt{Q_2}}{\sqrt{Q_1} - \sqrt{Q_2}} = 3,5$ см от заряда Q_1 ;

$l - x = 2,55$ см от заряда Q_2 .

17.2. Кроме силы тяжести \vec{F}_T и силы натяжения нити \vec{F}_H , на заряженный шарик маятника действует еще электрическая сила \vec{F}_K притяжения к противоположно заряженному шарiku, находящемуся ниже. Эта сила, как и сила тяжести, будет давать составляющую на направление движения, что увеличит возвращающую силу: $\vec{F} = \vec{F}' + \vec{F}''$ (рис. 19). При этом увеличится среднее значение ускорения маятника, а период соответственно уменьшится. Положение равновесия маятника останется вертикальным.

17.3. $F = 2 \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \frac{\alpha}{2} = 0,59$ нН.

17.4. $F = \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{Q_1^2}{a^4} + \frac{Q_2^2}{b^4} - \frac{Q_1 Q_2}{a^3 b^3} (a^2 + b^2 - c^2)} \approx 7,25$ мН.

17.5. $Q = 263$ нКл.

17.6. $F_1 = 1,42$ Н; $F_2 = 5,80$ Н.

17.7. $Q = 18,27$ нКл.

17.8. $Q_1 \geq \frac{4\pi\epsilon_0 d^2 mg}{Q}$ — в равновесии;

$Q_1' \geq \frac{8\pi\epsilon_0 d^2 mg}{Q}$ — в устойчивом равновесии.

17.9. Условие равновесия системы: $m\vec{g} + \vec{F}_K + \vec{F}_H = 0$. Так как все силы, действующие на отклонившийся шарик, лежат в одной плоскости, выберем прямоугольную систему координат XOY , совместив ее начало с центром шарика (рис. 20). Спроецировав силы на соответствующие оси и учтя знаки проекций, запишем условие равновесия для шарика:

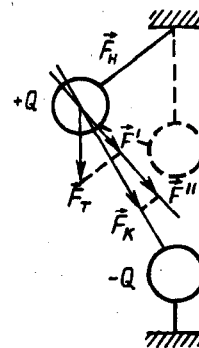


Рис. 19

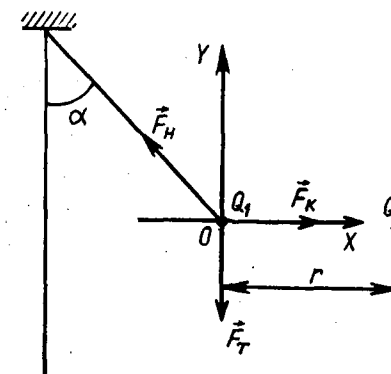


Рис. 20

$$\Sigma F_x = 0; F_k - F_n \sin \alpha = 0, \text{ или } F_k = F_n \sin \alpha;$$

$$\Sigma F_y = 0; F_n \cos \alpha - mg = 0, \text{ или } mg = F_n \cos \alpha.$$

Условие равновесия дает: $F_k = mg \operatorname{tg} \alpha$.
По закону Кулона

$$F_k = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ и } \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = mg \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда

$$Q_2 = \frac{4\pi\epsilon_0 r^2 mg \operatorname{tg} \alpha}{Q_1} = 56 \text{ нКл.}$$

17.10. $Q = \pm 8l \sqrt{\frac{\pi\epsilon_0 mg \sin^3 \alpha/2}{\cos \alpha/2}} \approx \pm 44,86 \text{ нКл.}$ Знаки \pm показывают, что заряды одноименные.

$$17.11. Q^2 = \frac{16\pi\epsilon_0 mgl^2 \sin^3 \alpha/2}{\cos \beta \sqrt{3 - 4 \sin^2 \alpha/2}} \approx 64,5 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}^2, \text{ где } \beta = 30^\circ, \text{ так}$$

как в основании равносторонний треугольник. $Q = 0,8 \text{ мкКл.}$

$$17.12. \text{ Уравнение движения } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \text{ откуда}$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{mr}} \approx 2,2 \text{ Мм/с;}$$

$$a = \frac{v^2}{r} \approx 9,2 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2.$$

$$17.13. Q = \frac{r}{\sin \alpha} \sqrt{2\pi\epsilon_0 m \left(\frac{g}{\cos \alpha} - \frac{\omega^2 r}{\sin \alpha} \right)} = 0,13 \text{ мкКл.}$$

17.14. Сила, с которой взаимодействуют заряды Q_1 и Q_2 , по закону Кулона обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Такая же зависимость силы притяжения между планетами и Солнцем.

По третьему закону Кеплера квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит. Очевидно, закон Кеплера справедлив и для движения заряда Q_1 вокруг закрепленного заряда Q_2 . Таким образом, если мы найдем период обращения заряда по окружности любого заданного радиуса, то этим самым найдем ответ на вопрос задачи. Очевидно, что частицы, траектории которых имеют одинаковые большие полуоси, имеют одинаковые периоды обращения по этим траекториям. Это означает, что период обращения частицы в данной задаче равен периоду обращения частицы по окружности радиуса

$\frac{R+r}{2}$. Найдем его. При движении заряда Q_1 по окружности радиуса $\frac{R+r}{2}$ центростремительное ускорение $a_{ц} = \omega^2 \left(\frac{R+r}{2} \right)$ ему сообщает кулоновская сила:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{\left(\frac{R+r}{2} \right)^2}.$$

Следовательно,

$$m\omega^2 \left(\frac{R+r}{2} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{\left(\frac{R+r}{2} \right)^2},$$

откуда

$$\omega = \sqrt{\frac{2Q_1 Q_2}{\pi\epsilon_0 m(R+r)^3}},$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{\pi\epsilon_0 m(R+r)^3}{2Q_1 Q_2}}.$$

17.15.

$$h = \frac{Q\sqrt{\pi\epsilon_0 mg}}{4\pi\epsilon_0 mg} - \frac{3mg}{k} = 20 \text{ см.}$$

17.16. Линейная плотность заряда на участке dx равна $\tau = \frac{Q_1}{l}$, заряд его $dQ = \tau dx$ (рис. 21).

Сила

$$dF = \frac{Q_2 \tau dx}{4\pi\epsilon_0 x^2},$$

где x — расстояние между зарядами. Общая сила

$$F = \int_{r-\frac{l}{2}}^{r+\frac{l}{2}} \frac{Q_2 \tau dx}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{Q_2 \tau}{4\pi\epsilon_0} \int_{r-\frac{l}{2}}^{r+\frac{l}{2}} \frac{dx}{x^2},$$

$$\frac{dx}{x^2} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 - \frac{l^2}{4} \right)},$$

$$\text{откуда } Q_2 = \frac{\pi\epsilon_0 F(4r^2 - l^2)}{Q_1} = 76,2 \text{ фКл.}$$

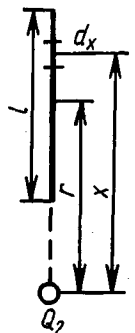


Рис. 21

17.17. Из рисунка 22 видно,

$$\text{что } \Delta F = 2F_n \sin \frac{\alpha}{2},$$

$$\text{а } F = \frac{Q_2 \Delta Q}{4\pi\epsilon_0 R^2},$$

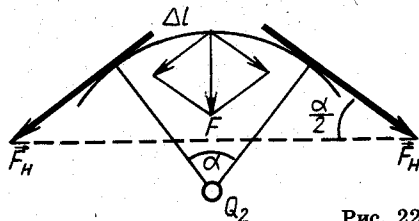


Рис. 22

где ΔQ — заряд на участке дуги Δl . Для малых углов $\Delta F = F_n \alpha$. Учитывая, что $\Delta Q = \frac{Q_1}{4\pi} \alpha$, получим:

$$F_n = \frac{Q_1 Q_2}{8\pi^2 \epsilon_0 R^2} = 0,7 \text{ мН.}$$

$$17.18. F = \int dF \cos \alpha = \frac{Q_1 Q_2 r}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + r^2)^{3/2}} = 28,3 \text{ мкН.}$$

$$17.19. l = \sqrt[3]{\frac{Q_1 Q_2 R}{4\pi\epsilon_0 mg}} = 7,2 \text{ см.}$$

$$17.20. a = g - \frac{\tau Q_1 R h}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}} \approx 8,4 \text{ м/с}^2.$$

$$17.21. T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^2 - \left(\frac{QE}{m}\right)^2}} = 1,56 \text{ с.}$$

$$17.22. E = \frac{F_n - mg(3 - 2 \cos \alpha)}{2Q \sin \alpha} \approx 46 \text{ кВ/м.}$$

$$17.23. T = 2\pi \sqrt{\frac{l \cos \alpha}{g - \frac{QE}{m}}} = 3,3 \text{ с.}$$

$$17.24. E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 e} \sqrt{\frac{Q_1^2}{r_1^4} + \frac{Q_2^2}{r_2^4} - \frac{Q_1 Q_2 (r_1^2 + r_2^2 - r^2)}{r_1^3 r_2^3}} \approx 35 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

$$17.25. E_1 = \frac{4,4 Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 1,43 \text{ МВ/м; } E_2 = \frac{2 Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 648 \frac{\text{кВ}}{\text{м}};$$

$$E_3 = \frac{0,6 Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 194,3 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}; E_4 = \frac{\sqrt{2} Q_1}{2\pi\epsilon_0 l^2} = 230 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

$$17.26. E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Qx}{\left(\frac{l^2}{4} + x^2\right)^{3/2}}. \text{ Видно, что эта формула выражает}$$

модуль $|\vec{E}|$ в произвольной точке, как функцию координаты x этой точки. После дифференцирования по x находим $x_{1,2} = \pm l/2\sqrt{2} = \pm 1,8 \text{ см}$. Два значения x соответствуют точкам, расположенным по обе стороны от центра симметрии точки O на расстоянии 1,8 см от нее.

$$17.27. \text{Можно. } d = \frac{8\alpha}{\epsilon_0 E^2} = 4,5 \text{ мм.}$$

$$17.28. 0; 3,7 \text{ кВ/м; } 2,8 \text{ кВ/м.}$$

$$17.29. E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r} = 9,0 \text{ В/м.}$$

$$17.30. F = \frac{\tau^2}{2\pi\epsilon_0 l} = 2 \text{ мкН.}$$

$$17.31. E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{4r^2 + l^2}} = 3,5 \text{ кВ/м.}$$

$$17.32. E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R}.$$

$$17.33. E = \frac{\tau R h}{2\epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}}; E = 0; E_{\max} \text{ при } h = R \frac{\sqrt{2}}{2}; E_{\min} \text{ при } h = \infty.$$

$$17.34. E = \frac{Q}{2\pi^2 \epsilon_0 R^2} = 576 \text{ кВ/м;}$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R^2 \varphi} \sin \frac{\varphi}{2} = 740 \text{ кВ/м.}$$

$$17.35. E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + R^2}} \right]; E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}; E_{\max} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

при $h = 0$; $E \rightarrow 0$ при $h \rightarrow \infty$.

$$17.36. E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R/l)^2}} \right) = 40,5 \text{ В/м.}$$

$$17.37. \varphi = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 (R_2 + R_1)} = 18 \text{ кВ.}$$

17.38. Как видно из рисунка 23, потенциал поля в точке A равен

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2; d\varphi_1 = -E dr_1 = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{dr_1}{r_1}; \varphi_1 =$$

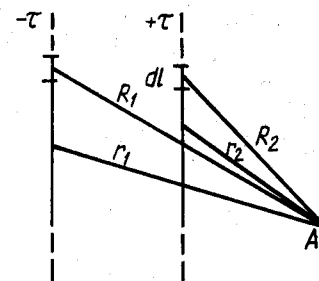


Рис. 23

$$= -\frac{r}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dr_1}{r_1} = -\frac{r}{2\pi\epsilon_0} \ln r_1 + C_1.$$

Аналогично найдем φ_2 . Учитывая, что $C_1 = C_2$, получим:

$$\varphi = \frac{r}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

$$17.39. \varphi = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} (\sqrt{R_2^2 + r^2} - \sqrt{R_1^2 + r^2}).$$

$$17.40. R_1 = \frac{R_0 Q}{Q - 4\pi\epsilon_0 \lambda q R} = 24,5 \text{ мм} — \text{ радиус первой эквипотенциальной поверхности. В общем виде для любой эквипотенциальной поверхности } R_n = \frac{R_0 Q}{Q - n 4\pi\epsilon_0 \lambda q R_0}, \text{ где } n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$17.41. \text{ Для радиуса любой эквипотенциальной поверхности } R_0 = \frac{R_0}{1 - 0,1n}, \text{ где } n = 0, 1, 2, 3, \dots; R_1 = R_0 = 1 \text{ см}; R_2 = 1,11 \text{ см}; R_3 = 1,25 \text{ см и т. д.}$$

$$17.42. \text{ При } \varphi_A = 0 \text{ имеем } \varphi_B = -25 \text{ В}, \varphi_D = -75 \text{ В}; \text{ если } \varphi_C = 0, \text{ то } \varphi_B = 25 \text{ В}, \varphi_D = -25 \text{ В}; \text{ при } \varphi_E = 0 \text{ имеем } \varphi_B = 75 \text{ В}, \varphi_D = 25 \text{ В}.$$

$$17.43. l_2 = \frac{l_1^2 E_1}{l_1 E_1 - \lambda U} = 31,2 \text{ мм};$$

$$l_2' = \frac{l_1^2 E_1}{\lambda U + l_1 E_1} = 21 \text{ мм}.$$

$$17.44. \varphi = \frac{n q_1}{\sqrt{n}}.$$

$$17.45. \varphi_1 = \varphi_2 \text{ (это значит, что потенциал всюду одинаков и равен потенциалу на поверхности); } \varphi_2 = 180 \text{ В}; \varphi_3 = 90 \text{ В}.$$

$$17.46. A = \frac{Q_2(Q_2 - Q_1)}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2} = 0,3 \text{ мДж}.$$

$$17.47. A = 3mg \approx 30 \text{ мДж}.$$

$$17.48. A = -\sqrt{k(Q^2/4\pi\epsilon_0)^2} = -90 \text{ мДж}.$$

$$17.50. F = \frac{Q^2 R}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(l_2 + l_1) \sqrt{l_1^4 + l_2^4}}{(l_1 \cdot l_2)^3}.$$

$$17.51. Q_1 = -\frac{R}{r} Q \text{ (знак «-» показывает, что заряд } Q_1 \text{ противоположный по знаку заряду } Q_2).$$

$$17.52. F = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 (2l)^2} \approx 0,36 \text{ мН}.$$

$$17.53. \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

$$17.54. \varphi = \frac{Q_1 - Q_2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

$$17.55. \text{ Электрическое поле внутри и вне сферы равно полю точечного заряда } Q, \text{ помещенного в ее центре; электрическое поле отсутствует всюду, кроме области внутри сферы.}$$

$$17.56. \sigma = \sigma_0 \cos \alpha.$$

$$17.57. \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Q(l-2r)}{r(l-r)} = 3,6 \text{ кВ}.$$

$$17.58. \sigma_1' = \sigma_1'' = Q/2S — \text{ пластины 1}; \\ \sigma_2' = -\sigma_2'' = -Q/2S — \text{ пластины 2}.$$

$$17.59. \Delta\varphi = \frac{Q}{2\epsilon_0 S} (l_1 - l_2).$$

$$17.60. E = \rho a / 3\epsilon_0.$$

$$17.61. T = 2\pi \sqrt{\frac{lm}{2QE}} \approx 20 \text{ пс}.$$

$$17.62. Q_2 = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} Q_1 = 180 \text{ нКл};$$

$$\sigma = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q_2}{4\pi R^2} = 5,7 \text{ мкКл/м}^2.$$

Знак поляризационного заряда противоположен знаку заряда на шарике.

$$17.63. E_1 = 14,4 \text{ кВ/м}; E_2 = 8,9 \text{ кВ/м}.$$

$$17.64. \sigma = \epsilon_0 \epsilon_r U / h = 1,5 \text{ мкКл/м}^2; \sigma' = \frac{\epsilon_0(\epsilon_r - 1)U}{h} = 1,5 \text{ мкКл/м}^2.$$

$$17.65. E_1 = \frac{Q r_1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r R^3} \approx 533 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}; E_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r_2^2} = 2,3 \frac{\text{МВ}}{\text{м}};$$

$$D_1 = \frac{Q r_1}{4\pi R^3} = 23,6 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}; D_2 = \frac{Q}{4\pi r_2^2} = 19,5 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2};$$

$$\varphi_1 = \frac{Q(3R^2 - r_1^2)}{8\pi\epsilon_0 \epsilon_r R^3} \approx 30 \text{ кВ}; \varphi_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r_2} \approx 90 \text{ кВ}.$$

$$17.66. 1) D = E = 0; 2) D = \frac{\rho(r_2^3 - R_1^3)}{3r_2^2} = 23 \text{ нКл/м}^2; E = 523 \text{ В/м};$$

$$3) D = \frac{\rho(R_2^3 - R_1^3)}{3(R_2 + l)^2} \approx 12,1 \text{ нКл/м}^2;$$

$$E = \frac{\rho(R_2^3 - R_1^3)}{3\epsilon_0(\epsilon_r)_2(R_2 + l)} \approx 550 \text{ В/м};$$

$$\Delta\varphi = \frac{\rho}{3\epsilon_0(\epsilon_r)_1} \cdot \frac{R_2^3 - 3R_2^2 R_1 + 2R_1^3}{2R_2} \approx 9,9 \text{ В}.$$

$$17.67. Q'_1 = \frac{(Q_1 + Q_2)R_1}{R_1 + R_2} = 9,6 \text{ нКл};$$

$$Q'_2 = (Q_1 + Q_2) - Q'_1 = 21,5 \text{ нКл}.$$

$$17.68. Q'_1 = \frac{(Q_1 + Q_2)R_1}{R_1 + R_2}; Q'_2 = \frac{(Q_1 + Q_2)R_2}{R_1 + R_2}; \varphi = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2}.$$

$$17.69. E_1 = \frac{R_1 \varphi_1}{(R_1 + l)^2} = 3,3 \text{ В/см};$$

$$E_2 = \frac{R_2^2 \varphi_1}{(R_1 + l)^2 (R_1 + R_2)} = 1,1 \text{ В/м}.$$

$$17.70. U = \frac{3}{2} \frac{Q}{C}.$$

$$17.71. C = 174 \text{ пФ}.$$

$$17.72. C = 75,4 \text{ пФ}.$$

$$17.73. r \approx 10 \text{ см}.$$

$$17.74. U \leq \frac{C_1 + C_2}{C_2} U_1, \text{ если } C_1 < C_2;$$

$$U = U_1 + U_2, \text{ если } C_1 = C_2.$$

$$17.75. \Delta \varphi = \frac{C_1 \Delta \varphi_1 + C_2 \Delta \varphi_2}{C_1 + C_2} = 36,7 \text{ В}.$$

$$17.76. U_2 = \frac{C_1 U_1}{C_2 + C_1} = 12,5 \text{ В}.$$

$$17.77. C_2 = C_3 = \frac{1}{2} \left(C - \frac{Q_1}{U} \right) = 30 \text{ мкФ}. Q_2 = Q_3 = 7,5 \text{ мКл}.$$

$$17.78. n = \frac{2dC}{\varepsilon_0 \pi R^2} + 1 = 11 \text{ пластин}.$$

17.79. По 2 последовательно соединенных конденсатора в 4 параллельно соединенные ветви. Всего 8 конденсаторов.

$$17.80. \Delta U_{AB} = \frac{C_1 \mathcal{E}_1 - C_2 \mathcal{E}_2}{C_1 + C_2} = -1,3 \text{ В}.$$

$$17.81. C_{\text{общ}} = 2C.$$

$$17.82. Q_1 = C_1 \frac{C_3 \mathcal{E}_2 - C_1 \mathcal{E}_1}{C_1 + C_2}.$$

$$17.83. C = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d(\varepsilon_r - 1)}; C = \frac{2\varepsilon_0 S}{d}.$$

17.84. Разность потенциалов до внесения пластины 900 В, после внесения 675 В.

17.85. До соединения пластин $U_{ad} = \mathcal{E}$; $U_{ab} = U_{bc} = U_{cd} = \frac{\mathcal{E}}{3}$. Если принять $\varphi_a = 0$, то $\varphi_b = \frac{\mathcal{E}}{3}$; $\varphi_c = \frac{2}{3}\mathcal{E}$; $\varphi_d = \mathcal{E}$. Если b и c

соединить, то $\varphi_b = \varphi_c$ и $E_{bc} = 0$; $U_{ab} = U_{cd} = \frac{\mathcal{E}}{2}$.

Следовательно, напряженность поля $E_{ab} = E_{cd}$ возрастает. На пластинах b и c заряда не будет, а на a и d он возрастет.

17.86. Емкость системы (рис. 24): $C_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h + (d-h)\varepsilon_r}$. Напряжен-

ность в слоях: $E_1 = \frac{U_1}{d-h}$ и $E_2 = \frac{U_2}{h}$. Из условия $CU = C_1 U_1 = C_2 U_2$ находим: $E_1 = \frac{\varepsilon_r U}{(d-h)\varepsilon_r + h}$ и $E_2 = \frac{U}{(d-h)\varepsilon_r + h}$. До от-

ключения источника напряжения заряд $Q = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S U}{(d-h)\varepsilon_r + h}$ и распределен по поверхности с плотностью $\sigma = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U}{(d-h)\varepsilon_r + h}$.

Пусть напряженность поля в воздушном и диэлектрическом слоях после отключения конденсатора от источника тока и внесения в конденсатор диэлектрической пластины $E'_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ и $E'_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}$. Считая поле однородным и размер пластин значительно большим, чем расстояние между ними, получаем $E'_1 = \frac{U}{d}$ и $E'_2 = \frac{U}{\varepsilon_r d}$.

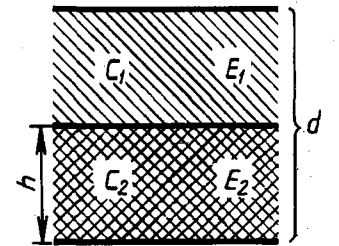


Рис. 24

$$17.87. Q_1 = Q \frac{x}{d}.$$

$$17.88. \Delta Q = \frac{1}{3} Q.$$

$$17.89. F = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2d^2} = 22,13 \text{ мН}.$$

$$17.90. \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{1}{4\sqrt{2}+1}} \approx 0,07.$$

17.91. $\varphi_1 = \frac{mg(h-R)}{\varphi_0 r}$, если шар не переполнится жидкостью прежде, чем зарядится до найденного предельного потенциала; $\varphi_2 = \frac{\varphi_0 R^2}{r^2}$ — когда шар наполняется полностью жидкостью.

$$17.92. n = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r m v_0^2 R}{Q^2} \text{ для случая } Q_{\text{max}} \gg Q.$$

$$17.93. \omega = \frac{1}{4R} \sqrt{\frac{Q}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r m R} (4Q_1 - Q)}; \frac{E_k}{E_p} = -\frac{1}{2}.$$

$$17.94. v = \sqrt{\frac{2Q_2}{m} \left(\sqrt{\frac{Q_1}{2\pi \varepsilon_0 E}} - l \right) \left(\frac{1}{l} \sqrt{\frac{Q_1 E}{4\pi \varepsilon_0}} - E \right)}.$$

$$17.95. A = \frac{Q^2}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 C_2}.$$

$$17.96. A = \frac{\varepsilon_0 \mathcal{E}^2 Sh}{d(d-h)} = 8,9 \text{ мкДж.}$$

$$17.97. A = -\frac{\mathcal{E}^2}{2}(C_1 - C_2) = 4 \text{ кДж.}$$

$$17.98. A = \frac{C_1 U_1^2}{2} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \approx 0,2 \text{ Дж; } U_2 = \frac{C_1}{C_2} U_1 = 1,5 \text{ кВ.}$$

$$17.99. A = 2dEQ.$$

$$17.100. F = \frac{Q^2}{32\pi^2 \varepsilon_0 R^4}.$$

$$17.101. W = \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = 20,3 \text{ мДж.}$$

17.102. Емкость C в обоих случаях уменьшается (увеличивается);
 U : 1) увеличивается (уменьшается), 2) $U = \text{const}$; W : 1) увеличивается (уменьшается), 2) уменьшается (увеличивается).

$$17.103. \Delta W = \frac{C_1 C_2}{2(C_1 + C_2)} (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)^2 > 0.$$

$$17.104. \Delta W = \frac{C_1 C_2 (C_1 - C_2)^2 U^2}{2(C_1 + C_2)^3} \approx 24 \text{ мДж, увеличится.}$$

$$17.105. F = 192 \text{ фН; } w = \frac{\varepsilon_0 U^2}{2d^2} \approx 16 \text{ мДж/м}^3.$$

$$17.106. A = \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{\varepsilon_0 S}{d} \right)^2 = 99,5 \text{ мкДж. До и после раздвижения}$$

плотность энергии w не изменилась и равна $w = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\frac{U}{d} \right)^2 \approx$
 $\approx 25 \text{ мДж/м}^3.$

$$17.107. C = 17,7 \text{ пФ; } Q = 5,3 \text{ нКл; } \Delta U = 0,6 \text{ кВ;}$$

$$W_1 = 0,8 \text{ мкДж; } W_2 = 2,4 \text{ мкДж.}$$

$$18.1. \langle v \rangle = \frac{AI}{N_{\text{Ав}} \rho S e} = 0,7 \text{ мкм/с.}$$

$$18.2. Q = \frac{1}{2} I \tau = 50 \text{ Кл.}$$

$$18.3. v = I / (Sne) \approx 1,3 \text{ мкм/с.}$$

$$18.4. I = 10 \text{ А; } \mathcal{E} = 122 \text{ В; } R = 121,8 \text{ Ом; } I_{\text{к.з}} = 610 \text{ А; } U = 0.$$

$$18.5. I_{\text{парал}} = 0,96 \text{ А; } I_1 = 1,52 \text{ А; } I_2 = 2,48 \text{ А; } I_{\text{послед}} = 1,71 \text{ А.}$$

$$18.6. U = 1,5 \text{ В.}$$

$$18.7. \Delta R = R_{t_2} - R_{t_1} = \alpha \rho \frac{l}{S} (t_2 - t_1) \approx 18,5 \text{ мОм.}$$

$$18.8. t = 2294,5 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$18.9. \Delta U = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

$$18.10. r = 2R; R_{\text{общ}} = 4R.$$

$$18.11. U = \mathcal{E} / 3 = 3 \text{ В.}$$

$$18.12. \text{а) } R_{\text{общ}} = 0,5 \text{ Ом; б) } R_{\text{общ}} \approx 0,3 \text{ Ом.}$$

$$18.13. \text{а) } R_{AB} = \frac{5}{11} R; \text{б) } R_{AB} = \frac{5}{6} R; \text{в) } R_{AB} = \frac{4}{5} R.$$

$$18.14. \text{а) } R_{ad} = 0,6 \text{ Ом; б) } R_{ac} = 2,0 \text{ Ом; в) } R_{ad} = 1,3 \text{ Ом; г) } R_{ab} =$$

$$= 1,0 \text{ Ом; д) } R_{ac} = 1,4 \text{ Ом; е) } R_{ac} = 1,8 \text{ Ом; ж) } R_{ab} = 0,5 \text{ Ом.}$$

$$18.15. R_{\text{общ}} = 2,7 \text{ Р.}$$

$$18.16. I = 3 \text{ А.}$$

18.17. В 10 раз. Параллельно соединенные реостаты включить параллельно прибору.

$$18.18. \mathcal{E} R_3 (R_3 + R_1) = \mathcal{E} R_4 / (R_2 + R_4).$$

$$18.19. I_1 = 1,0 \text{ А; } I_2 = 0,8 \text{ А; } I_3 = 0,2 \text{ А.}$$

$$18.20. \Delta t = 10^{-3} R_2 C.$$

$$18.21. \Delta Q = C \mathcal{E} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 83 \text{ мкКл.}$$

$$18.22. Q = CU \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

$$18.23. R_1 = 18,8 \text{ Ом; } R_2 = 5,5 \text{ Ом.}$$

$$18.24. I = 2,5 \text{ А.}$$

$$18.25. U_{AB} = \mathcal{E}; U_{AB} = 0.$$

$$18.26. I_{ab} = \mathcal{E} / 7R.$$

$$18.27. R = \frac{8}{225} (R_0 + 2l\rho).$$

18.28. Следует включить гальванометр в то плечо мостика Уитстона, в которое обычно включается искомое сопротивление R_x , а в диагональ мостика вместо гальванометра поставить ключ.

$$18.29. I_1 = I_2 = 27,0 \text{ мА; } I_3 = I_4 = 6,0 \text{ мА.}$$

$$18.30. R_1 = \frac{R_2 [UR_4 - I(r(R_3 + R_4) + R_3 R_4)]}{UR_3 + I(r(R_3 + R_4) + R_2 R_4 + R_3 R_2 + R_3 R_4)}.$$

$$18.31. R_1 / R_2 = 1/4.$$

$$18.32. I_1 = 0,4 \text{ А; } I_2 = 1,2 \text{ А; } I_3 = 1,6 \text{ А.}$$

$$18.33. I \approx 1,1 \text{ А.}$$

$$18.34. U_1 = \frac{UR_1 l x}{R_1 l^2 + R l x - R x^2}.$$

$$18.35. I_1 \approx 0,33 \text{ А; } I_2 = 0,66 \text{ А; } I_3 = 1,00 \text{ А.}$$

$$18.36. I = 0,45 \text{ мА.}$$

$$18.37. I = 75 \text{ мА.}$$

$$18.38. \mathcal{E} = \frac{I_4}{R_5 R_3} [R_1 (R_2 R_5 + R_3 R_5 + R_4 R_5 + R_2 R_4 + R_3 R_4) + R_3 (R_2 R_4 +$$

$$+ R_2 R_5 + R_1 R_5)].$$

$$18.39. I_1 \approx 0,7 \text{ А; } I_2 = 4,1 \text{ А; } I_3 = 4,9 \text{ А.}$$

$$18.40. U_1 \approx 4,0 \text{ В; } U_2 = 0,8 \text{ В; } U_3 \approx 36 \text{ мВ.}$$

$$18.41. I_1 = 4,57 \text{ А; } I_2 = 16,86 \text{ А; } I_3 \approx 12,3 \text{ А.}$$

$$18.42. I_1 = I_2 = 0,44 \text{ А; } I_3 = 0,88 \text{ А; } I_4 = 2,75 \text{ А; } I_5 = 2,18; I_6 =$$

$$= 1,45 \text{ А; } I_7 = 3,63 \text{ А.}$$

$$18.43. \text{Ключ разомкнут: } I_1 = I_2 = 0,9 \text{ А; } I_3 = I_4 = 2,0 \text{ А; } I = 2,9 \text{ А;}$$

$$R = 6,2 \text{ Ом.}$$

$$\text{Ключ замкнут: } I_1 = 0,7 \text{ А; } I_2 = 1,1 \text{ А; } I_3 \approx 2,3 \text{ А; } I_4 = 1,9 \text{ А;}$$

$$I_k = 0,4 \text{ А; } I = 3,0 \text{ А; } R \approx 6,1 \text{ Ом.}$$

18.44. $I_1 = 5,33 \text{ A}$; $I_2 = 4,34 \text{ A}$; $I_3 = 0,99 \text{ A}$; $P = 24,35 \text{ Вт}$.

18.45. $I_1 \approx 0,1 \text{ A}$; $I_2 \approx 42,0 \text{ мА}$; $I_3 \approx 60,0 \text{ мА}$.

18.46. $I_1 = 10,0 \text{ A}$; $I_2 = I_3 = 5,0 \text{ A}$.

18.47. а) $U = \mathcal{E}_1 - R_1 \frac{\mathcal{E}_2 + I_0 R_2}{R_1 + R_2} \approx 27 \text{ В}$;

б) $U = R_4 \frac{\mathcal{E}_1 - I_0 R_2}{R_2 + R_4} - R_1 \frac{\mathcal{E}_1 - I_0 R_2}{R_1 + R_3} \approx 23 \text{ В}$.

18.48. Из вычислений и графика зависимости мощности от R нагрузки следует, что из спиралей нужно составить нагреватель сопротивлением, как можно более близким к 20 Ом , т. е. к r . Использовать лишь спираль сопротивлением 20 Ом нельзя, так как при этом потребляемая мощность будет равна $P = \left(\frac{\mathcal{E}}{R+r}\right)^2 R = 5 \text{ Вт}$, что противоречит условию задачи, так как каждая из спиралей рассчитана на мощность не более 2 Вт . Из всех возможных схем соединения спиралей наилучшая имеет вид, представленный на рисунке 25.

18.49. КПД схемы a больше, чем схемы b .

18.50. $R_0 = \frac{R_2 t_1 - R_1 t_2}{t_1 - t_2} = 0,1 \text{ кОм}$.

18.51. $S = 410 \text{ мм}^2$; $U = 211 \text{ В}$; $\Delta P = 10\%$.

18.52. $P_1 = 4,50 \text{ кВт}$; $\Delta P = 540 \text{ Вт}$; $P_2 = 3,96 \text{ кВт}$; $\eta = 88\%$.

18.53. $n = \frac{I(\mathcal{E} - IR)}{2\pi r m g}$.

18.54. $Q = Pt + cm\theta + \lambda m$, где m — масса воды.

18.55. $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}$. При охлаждении нагревателя вентилятором выделяется большее количество тепла.

18.56. $P = 2,30 \text{ кВт}$; $l = U/J\rho_{t1} \approx 30,0 \text{ м}$;

$d = \frac{4k(t_2 - t_1)}{J^2 \rho_{t1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)]} = 0,93 \text{ мм}$.

18.57. $\Delta l/l_0 = k_1 I^2$, где k_1 — коэффициент пропорциональности;

$k_1 = \frac{4\alpha\rho}{\tau^2 d^2 k}$, где k — коэффициент теплоотдачи.

18.58. $I_2 = I_1 \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = 80 \text{ А}$.

18.59. $Q = \frac{1}{3} C \mathcal{E}^2$.

18.60. $Q = \frac{1}{2} C (\mathcal{E} - U_0)^2$.

18.61. $Q = \frac{C[(\mathcal{E} - U_0)^2 - (I_0 R)^2]}{2} + \frac{R}{R+r} \cdot \frac{C(U_0 - I_0 R)^2}{2r}$.

18.62. $S_{св} = \frac{c_m \rho_m S_m \Delta t}{\rho_{св} [c_{св}(t_{пл. св} - t_1) + q_{св}]} = 0,2 \text{ мм}^2$.

18.63. $\Delta t = \frac{\rho_{уд. сопр. и \rho_{плотн. св}} S^2 (C_{св} \Delta t_1 + q_{св})}{\rho_{уд. сопр. св} \rho_{плотн. и} S_m^2 c_m} = 2^\circ \text{С}$.

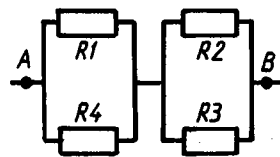


Рис. 25

18.64. 1) $t_{\text{посл}} = t_1 + t_2 = 45 \text{ мин}$;

2) $t_{\text{парал}} = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} = 10 \text{ мин}$.

18.65. $I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{k d^3 (t_2 - t_1)}{\rho_{t1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)]}} = 0,5 \text{ А}$.

18.66. $P = 605,0 \text{ Вт}$; $I = 2,75 \text{ А}$; $t = 17,3 \text{ мин}$; $C \approx 0,70 \text{ коп}$.

18.67. $U = 20,0 \text{ В}$; $I = 2,0 \text{ А}$; $r = 2,0 \text{ Ом}$;

$P = 40,0 \text{ Вт}$; $\Delta P = 8,0 \text{ Вт}$; $P_{\text{полн}} = 48,0 \text{ Вт}$.

18.68. $\eta = 42,0\%$; $P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2 I}{4(\mathcal{E} - Ir)} = 6,45 \text{ Вт}$;

$\eta = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}/2}{\mathcal{E}} = 50,0\%$.

18.72. $R = r$; $I = \mathcal{E}/2r$; $P_{\text{max}} = \mathcal{E}^2/4r$.

19.1. Да. $v_{\text{min}} = 833 \text{ км/с}$.

19.2. $d = \frac{I e^A / \kappa T}{\pi l B T^2} = 4,3 \text{ мм}$.

19.3. $J_2/J_1 = 2,6$.

19.4. $v = 987 \text{ км/с}$.

19.5. $v = 59,5 \text{ Мм/с}$; $W = 10,0 \text{ кэВ}$.

19.6. $n = 6,25 \cdot 10^{16}$ электронов.

19.7. $S = 1,2 \text{ мА/В}$; $R_i = 833 \text{ Ом}$.

19.8. $\mu_0 = 9$.

19.9. $\Delta I = 15 \text{ мА}$; $S = 5,0 \text{ мА/В}$.

19.10. $n = \frac{I}{eS} \sqrt{\frac{m}{2eU}} = 0,1 \text{ Тм}^{-3}$.

19.11. $Q_{\text{max}} = \frac{Q(T_1 - T_2)}{\mathcal{E} T_1} = 5,50 \text{ кКл}$.

19.12. $I = \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{R + R_g} = 80 \text{ мкА}$.

19.13. $t = 1015^\circ \text{С}$.

19.14. $\mathcal{E} = 25,0 \text{ мВ}$.

19.15. $R_g = 2,0 \text{ кОм}$.

19.16. $\Delta \varphi = 730 \text{ мВ}$.

19.17. $\Delta \varphi = 40 \text{ мВ}$.

19.18. $\Delta T = 8,7 \text{ К}$; $n = 89,5$ делений.

20.1. $m \approx 24 \text{ г}$.

20.2. $t = 74 \text{ с}$.

20.3. $k = 1,12 \text{ мкг/Кл}$ (серебро).

20.4. $Q = 15,00 \text{ кКл}$.

20.5. $t = 8,1 \text{ ч}$; $P = 2,8 \text{ мВт}$.

20.6. $t = 39 \text{ мин}$.

$$20.7. Q = \frac{\pi d^3 \rho}{6k} = 4,5 \text{ ГКл.}$$

$$20.8. T = \frac{pVM}{kRIt} = 309,7 \text{ К, где } R \text{ — универсальная газовая постоянная.}$$

$$20.9. k_{Ag} = 1,118 \text{ мг/Кл; } k_{Cu} = 329,0 \text{ мкг/Кл; } k_{Al} = 93,20 \text{ мкг/Кл; } k_{Ni} = 304,0 \text{ мкг/Кл.}$$

$$20.10. \eta = 53,0\%.$$

$$20.11. m_{Ni} = 34 \text{ г; } m_{Ag} = 9,2 \text{ г.}$$

$$20.12. \text{Нет. Амперметр должен показывать } 4,3 \text{ А.}$$

$$20.13. C \approx 5,2 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

$$20.14. m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг; } e = 0,16 \text{ аКл.}$$

$$20.15. N = 1,20 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$20.16. n = 5,0 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

$$20.17. h = \frac{Alt}{F_{np}S} \approx 77 \text{ мкм.}$$

$$20.18. t = \frac{m(R+r)}{k\mathcal{E}} \approx 9 \text{ ч } 32 \text{ мин.}$$

$$20.19. \sigma = \frac{Qn\alpha N_A}{A} (b_+ + b_-) = 0,92 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}.$$

$$20.20. W = 134 \text{ МДж.}$$

$$20.21. \alpha = 40,0\%.$$

$$20.22. n = 99,5 \text{ кг/м}^3.$$

$$20.23. v = 2,74 \text{ Мм/с.}$$

$$20.24. v_+ = 12,65 \text{ м/с; } v_- = 17,17 \text{ м/с.}$$

$$20.25. n = 3,9 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}.$$

$$20.26. N \approx 17 \text{ мм}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$20.27. v = 2,35 \text{ Мм/с.}$$

$$20.28. S = 57 \text{ мм}^2.$$

$$20.29. N = 5,0 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$20.30. \lambda = 31,3 \text{ мкм.}$$

$$20.31. U = \frac{dA}{e\lambda} \geq 161,25 \text{ МВ.}$$

$$20.32. A = 0,3 \text{ ГДж; } E = 2,5 \text{ кВ/м.}$$

$$20.33. n = 73746 \text{ атомов.}$$

$$21.1. B_1 = \mu_0 2I/\pi d = 240 \text{ мкТл; } B_2 = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \frac{r_1 - r_2}{r_1 \cdot r_2} = 80 \text{ мкТл.}$$

$$21.2. I = B\pi a/\mu_0(2\sqrt{2}-1) = 34 \text{ А.}$$

$$21.3. B = \mu_0 I 2\sqrt{2}/\pi a = 230 \text{ мкТл.}$$

$$21.4. B = \mu_0 I/4\pi a = 15 \text{ мкТл.}$$

$$21.5. B = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I}{2\pi a} \left(\sin \alpha + \sin \frac{\alpha}{2} \right) = 24 \text{ мкТл.}$$

$$21.6. I = \frac{\sqrt{3}}{3} \pi a B/\mu_0 = 2,9 \text{ А.}$$

$$21.7. B = \mu_0 \sqrt{I_1^2 + I_2^2}/d = 63 \text{ мкТл.}$$

$$21.8. 2,1 \text{ мкТл.}$$

$$21.9. 6 \text{ А.}$$

$$21.10. I = 2\pi RB/(\pi + 1)\mu_0 = 12 \text{ А.}$$

$$21.11. B = R^3 B_0/(R^2 + d^2)^{3/2} = 5,4 \text{ мкТл.}$$

$$21.12. B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{l^2 + d^2}} = 4,9 \text{ мТл.}$$

$$21.13. I = 2RB_0 \operatorname{tg} \alpha/n = 0,8 \text{ А.}$$

$$21.14. n = 2B_0 R \operatorname{tg} \alpha t/NC\mathcal{E} = 100.$$

$$21.15. B = \mu_0 NI/3R.$$

$$21.16. B = \frac{2}{3} \mu_0 R \omega \sigma.$$

$$21.17. p_m = 2\pi(R^2 + d^2)^{3/2} \frac{B}{\mu_0} = 78 \text{ мА} \cdot \text{м}^2.$$

$$21.18. p_m = \frac{\pi n}{4} d^2 I = 0,5 \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

$$21.19. B_1 = \mu_0 \frac{Ir_1}{2\pi R^2} = 800 \text{ мкТл; } B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} = 200 \text{ мкТл.}$$

$$21.20. B_1 = 0; B_2 = \frac{I\mu_0}{2\pi(R+r)} = 0,2 \text{ мТл.}$$

$$21.21. B_1 = 50 \text{ мкТл; } B_2 = 0.$$

$$21.22. v = 4\pi r^2 \frac{B}{\mu_0}/l = 160 \text{ км/с.}$$

$$21.23. B = \mu_0 \frac{l}{4\pi r^2} \sqrt{2lU/m} = 0,3 \text{ мТл.}$$

$$21.24. B = \mu_0 l \sqrt{\pi m \epsilon_0 R/8\pi^2 m \epsilon_0 R^3} = 12 \text{ Тл.}$$

$$21.25. B = \mu_0 \mu \omega \sigma R = 2,5 \text{ мкТ.}$$

$$21.26. 250 \text{ мкВ6; } 630.$$

$$21.27. 2,5 \text{ А; } 320.$$

$$21.28. \mu = \pi d(\Phi_1 - \Phi_2)/(h_2 \Phi_1 - h_1 \Phi_1) = 310.$$

$$21.29. \Phi = Na^2 \mu_0 I/\pi d = 1,3 \text{ мВб.}$$

$$21.30. B = 0.$$

$$21.31. I = S \rho g/B \sin \alpha = 7,0 \text{ А, где } \rho \text{ — плотность проводника.}$$

$$21.32. F = \frac{\mu_0 N I_1 I_2 d}{\sqrt{R^2 + d^2}} = 420 \text{ мкН.}$$

$$21.33. F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 a^2}{l(l+a)} = 5,3 \text{ мкН.}$$

$$21.34. P = l B v \sin \alpha = 5 \text{ Вт.}$$

$$21.35. B = \mu m g/l = 0,2 \text{ Тл.}$$

$$21.36. B = \frac{1}{\mu_0 R} \sqrt{2mU/l} = 0,75 \text{ мТл.}$$

$$21.37. R = mv \sin \alpha/lB = 2,4 \text{ мм; } h = 2\pi m v \cos \alpha/lB = 2,6 \text{ см.}$$

$$21.38. R = \sqrt{2mE/lB} = 65 \text{ см.}$$

$$21.39. v = E/B \sin \alpha = 1 \text{ Мм/с.}$$

21.40. Поперечная разность потенциалов, возникающая в пластине с током при помещении ее в магнитном поле, $\Delta\varphi = \frac{1}{ne} IB \frac{1}{d}$.

Пусть Z — число свободных электронов, приходящихся на один атом. Тогда $n = Zn_0$, где n_0 — число атомов в единице объема. Масса одного атома равна $\frac{\rho}{n_0} = \frac{A}{N}$, где ρ — плотность, A — атомная масса, N — постоянная Авогадро. Тогда $n_0 = \frac{N\rho}{A}$, $n = \frac{N\rho}{A} Z$. Подставив значение n и учитывая, что

$$\text{число Фарадея } F = eN, \text{ найдем: } \Delta\varphi = \frac{A}{F\rho Z} \frac{IB}{d} = 4,5 \text{ мкВ.}$$

$$21.41. \Delta\varphi = \frac{A}{F\rho Z} jBb = 16 \text{ мкВ.}$$

$$21.42. n = 2IB/3l\Delta\varphi d = 8,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}.$$

$$21.43. B_0 = \frac{\pi^2 mg^2}{3\rho_m T^2} - B = 20 \text{ мкТл.}$$

$$21.44. T = \pi l \sqrt{m/3\rho_m B} = 0,75 \text{ с.}$$

$$21.45. B_0 = \pi^2 ml^2/3\rho_m T^2 = 20 \text{ мкТл.}$$

21.46. Индукция магнитного поля на оси соленоида вдали от него

равна $B = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}$. По условию задачи $d \gg R$, поэтому

$B = \mu_0 \frac{n I R^2}{2d^3} = \mu_0 \frac{\pi n I R^2}{2\pi d^3} = \mu_0 \frac{(p_m)_1}{\pi d^3}$, где $(p_m)_1 = nIS$ — магнитный момент соленоида. На магнит, находящийся в неоднородном магнитном поле, действует сила $F = (p_m)_2 \frac{\Delta B}{\Delta x} \cos \alpha = (p_m)_2 \frac{\Delta B}{\Delta x}$ ($\cos \alpha = 1$, так как оси магнита и соленоида направлены вдоль одной прямой). Пусть $\Delta x = l$ — длина магнита,

$$\text{тогда } \Delta B = B_1 - B_2 = \mu_0 \left[\frac{(p_m)_1}{\pi d^3} - \frac{(p_m)_1}{2\pi(\pi + l)^3} \right] = \frac{\mu_0 (p_m)_1}{2\pi d^3} \cdot \frac{3l}{d},$$

$$F = (p_m)_2 \frac{3\mu_0 l (p_m)_1}{2\pi d^4} = \frac{3\mu_0 (p_m)_1 (p_m)_2}{2\pi d^4} = 0,9 \text{ мкН.}$$

$$21.47. F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d} l = 1 \text{ Н.}$$

$$21.48. F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\mathcal{I}^2 l_1}{\left(r + \rho \frac{2l_2}{S}\right)^2 d} = 54 \text{ мН.}$$

$$21.49. 0,12 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$21.50. M = IBSN \sin \alpha = 0,25 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$21.51. C = \pi r^4 Gd / l L B N \sin \alpha = 0,23 \text{ мкА.}$$

$$21.52. I \approx 2 \sqrt{\pi d h \sigma_{\text{пр}} / \mu_0} \approx 1,7 \text{ МА.}$$

$$22.1. A = BIl_s = 0,05 \text{ Дж.}$$

$$22.2. A = \pi R^2 IB \cos \alpha = 0,31 \text{ Дж.}$$

$$22.3. \Delta\varphi = B_0 l v \sin \alpha = 0,48 \text{ МВ.}$$

$$22.4. \Delta\varphi = \pi n R^2 \mu_0 H = 1 \text{ мВ.}$$

$$22.5. 1,5 \text{ мВ.}$$

$$22.6. B = \frac{2U}{\omega l^2} = 0,2 \text{ Тл.}$$

$$22.7. B = (R_1 + R_2) / 2nS = 0,18 \text{ Тл.}$$

$$22.8. l = Q \frac{2\pi BSR^2}{(2\pi rR + r_{\text{вн}} S) C_6} = 1 \text{ м.}$$

$$22.9. 0,4 \text{ Гн.}$$

$$22.10. L = \pi R^2 N B / I = 1,6 \text{ мГн.}$$

$$22.11. L = SBN / I = 1 \text{ Гн.}$$

$$22.12. L = \mu_0 \mu l_1^2 / 4\pi l_2 = 40 \text{ мГн.}$$

$$22.13. 0,2 \text{ Гн.}$$

$$22.14. 8 \text{ мГн.}$$

$$22.15. 2 \text{ мГн.}$$

$$22.16. L_{12} = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

$$22.17. 63 \text{ В.}$$

$$22.18. \mathcal{I}(t) = 0,06 e^{-2t}.$$

$$22.19. l = \frac{\pi \mu_0 \mu N^2 d^2}{4Rt} \ln \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{I} - IR} = 0,57 \text{ м.}$$

$$22.20. W = \pi \mu_0 N^2 R^2 I^2 / 2l = 10 \text{ мДж.}$$

$$22.21. t = \mu_0 nRS / 2\rho = 0,36 \text{ мс.}$$

$$22.22. W = \frac{Ll^2}{2} e^{\frac{2R}{L}t} = 0,23 \text{ Дж.}$$

$$22.23. \mu = B(\pi d - b) / (NI\mu_0 - bB) = 2,5 \cdot 10^3.$$

$$22.24. W = \pi RSBH = 0,6 \text{ Дж, где } H = \frac{N}{2\pi R} I = 530 \text{ А/м; } B = 1,2 \text{ Тл.}$$

$$22.25. \text{ Не произойдет.}$$

$$22.26. v = \frac{16\rho Dg}{d^2 B_0^2 \alpha^2}, \text{ где } \rho \text{ и } D \text{ — удельное сопротивление и плотность материала кольца.}$$

$$23.1. I_{\text{эф}} = \frac{\pi \sqrt{2}}{4} I_{\text{ср}} = 2,2 \text{ А.}$$

$$23.2. 0,4 \text{ А; } 0,2 \text{ А.}$$

$$23.3. \text{ Прибор магнитоэлектрической системы покажет } I_1 = \frac{I_m}{\pi} =$$

$$= 1,6 \text{ А, а прибор тепловой системы — } I_2 = \frac{I_m}{2} = 2,5 \text{ А.}$$

$$23.4. 2 \text{ мВ; } 1,4 \text{ мВ.}$$

23.5. 32 мкФ.

$$23.6. L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_1}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2} = 0,19 \text{ Гн.}$$

23.7. 1,2 А; 50 Гц; 5,5 кВ.

23.8. $L = 0,02 \text{ Гн.}$

23.9. $\Delta t_1 = 3,3 \text{ мс; } \Delta t_2 = 6,6 \text{ мс.}$

23.10. 32 Ом.

23.11. 260 мА; 0,18 А; $76^\circ 49'$; 5,1 Вт.

23.12. 0,8 А; 93 Вт; $13^\circ 15'$.

23.13. 25 мГн; 9 Ом; $41^\circ 24'$.

23.14. 0,35 А; 12 мВт.

$$23.15. n = \sqrt{\frac{3(12L - CR^2)}{4L - 3CR^2}} = 3,1 \text{ раза.}$$

$$23.16. L = \frac{\nu \sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi(\nu_p^2 - \nu^2)} = 10 \text{ Гн.}$$

$$23.17. t = \frac{\pi}{4} \sqrt{LC} = 39 \text{ мкс.}$$

$$23.18. C = \frac{LI^2}{U^2} = 200 \text{ пФ.}$$

$$23.19. R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}} = 100 \text{ Ом.}$$

$$23.20. \nu = \frac{1}{2\pi RN} \sqrt{\frac{l}{\pi\mu_0 C}} = 3,6 \text{ кГц.}$$

$$23.21. \Theta = 2\pi R \sqrt{C/(4L - C^2)} = 0,14.$$

$$23.22. R = \frac{2L}{t} \ln n = 28 \text{ Ом.}$$

$$23.23. \nu = \frac{I_m}{2\pi CU_m} = 160 \text{ Гц.}$$

$$23.24. E = \frac{\Theta I_m^2 t}{2\pi} \sqrt{L/C} = 86 \text{ мДж.}$$

23.25. 1,5 км.

23.26. $1,1 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$

$$23.27. \nu = \frac{C}{2l\sqrt{\epsilon\mu}} = 59 \text{ МГц.}$$

$$23.28. U_2' = \frac{kU_1}{\sqrt{(\mu_1/\mu_2)^2[(kU_1/U_2)^2 - 1]}} = 20 \text{ В.}$$

24.1. 2 м.

24.2. $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

$$24.3. N = \frac{4ab}{a+b} \cdot \frac{(n-1)^2 \varphi^2}{\lambda}.$$

$$24.4. \Delta x = \lambda \frac{L + r \cos \alpha}{2r \sin \alpha} = 48,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Наибольшая ширина щели $\Delta s \approx \frac{\lambda}{2u}$, где u — угол между крайними лучами, участвующими в интерференции ($u = 2\alpha$); $\Delta s = 0,86 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

24.5. $\alpha = 9'10''$.

24.6. Источники S_1 и S_2 — когерентны (рис. 26). Разность хода

$$\Delta_1 = l_2 - l_1 + \frac{\lambda}{2}; \quad l_2 = \sqrt{l_1^2 + H^2}; \quad l_2 - l_1 = l_1 \sqrt{1 + \left(\frac{H}{l_1}\right)^2} - l_1 =$$

$$= l_1 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{H}{l_1}\right)^2} - 1 \right]; \quad \frac{H}{l_1} \ll 1. \text{ Так как } \sqrt{1 - a} \approx 1 + \frac{1}{2}a \text{ при}$$

$$a \ll 1, \text{ то } l_2 - l_1 \approx l_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H}{l_1}\right)^2 - 1 \right] = \frac{H^2}{2l_1}. \text{ Следовательно,}$$

$$\Delta_1 = \frac{H^2}{2l_1} + \frac{\lambda}{2}, \text{ но } \lambda_1 = m_1 \frac{\lambda}{2}; \text{ тогда } \frac{H^2}{2l_1} + \frac{\lambda}{2} = m_1 \frac{\lambda}{2}. \text{ Так как}$$

$$H = 2h, \text{ то } m_1 = \frac{\frac{H^2}{2l_1} + \frac{\lambda}{2}}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{4h}{2l_1} + 1 = 33; \quad m_1 - \text{нечетное, сле-}$$

довательно, в точке А наблюдается ослабление. При введении стеклянной пластины изменяется оптическая разность хода:

$$\Delta_2 = l_2 - l_1' + \frac{\lambda}{2}, \text{ где } l_1' = (l_1 - d) + nd, \quad d - \text{толщина пластины,}$$

$$n - \text{ее показатель преломления. Тогда } \Delta_2 = l_2 - [(l_1 - d) + nd] +$$

$$+ \frac{\lambda}{2} = l_2 - [l_1 + (n-1)d] + \frac{\lambda}{2}; \quad \Delta_2 = \Delta_1 - (n-1)d; \quad m_2 = \frac{\Delta_2}{\lambda} =$$

$$= \frac{\Delta_1 - (n-1)d}{\lambda} = m_1 - 2 \frac{d(n-1)}{\lambda} = 20. \quad \text{В точке А будет усиление.}$$

24.7. Полосы сместятся в сторону перекрытой щели на расстояние

$$\Delta x = \frac{hl(n-1)}{d} = 2,0 \text{ мм.}$$

$$24.8. d = m\lambda/2(n-1) = 36 \text{ мкм.}$$

$$24.9. d < \frac{l}{4n} = 100 \text{ нм.}$$

24.10. $\lambda = 0,517 \text{ мкм.}$ Пленка будет зеленой.

24.11. 140 нм.

24.12. 109, 218 ... $(2k-1)109 \text{ мкм.}$

24.13. $h_{\min} = 1,6 \text{ мкм; } h_{\max} = 1,9 \text{ мкм.}$

24.14. 2,2 мм.

24.15. $20''$.

24.16. 54 полосы.

24.17. 1,35.

24.20. 1,13 мкм.

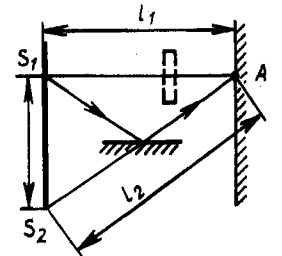


Рис. 26

24.21. 2 мм.

$$24.22. r_n = \sqrt{\frac{n\lambda}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}$$

$$24.23. F = \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_1^4 + r_2^4} \cdot \frac{1}{(n-1)m\lambda} = 54 \text{ см.}$$

24.24. 0,3 мм.

24.25. При отсутствии контакта $\frac{r_1^2}{R} + 2d = 5\lambda$. При удалении пыли $\frac{r_2^2}{R} = 5\lambda$. Следовательно, $d = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2R} = 1,8 \text{ мкм.}$

24.26. 1,36.

24.27. $n^1 = n + \frac{N\lambda}{l}$, где n — показатель преломления воздуха.

$$24.28. n_1 = \sqrt{n} = 1,33.$$

24.29. Около $10^{-4} \Phi_0$ для желтой области. Около $3 \cdot 10^{-2} \Phi_0$ для фиолетовой области.

$$25.1. b = \frac{ar^2}{m\lambda a - r^2} = 1 \text{ м.}$$

$$25.2. r_{12}^2 = 3r_4^2; r_{12} = 3\sqrt{3} \text{ мм} = 5,2 \text{ мм.}$$

$$25.3. \sin \varphi = \sin \alpha \pm m \frac{\lambda}{b}.$$

25.4. Если диафрагма находится посередине между A и B , то в отверстие радиусом 1 мм можно вписать $k=4$ зоны Френеля ($k = \frac{2r^2 a}{\lambda a^2} = 4$). Следовательно, в точке B будет гашение.

Если диафрагма находится на расстоянии 50 см от A , то $k_1 \approx 5,3$ зон Френеля. Если расстояние диафрагмы от A сделать равным 150 см, а от B — 50 см, то число зон Френеля будет тем же. Следовательно, при перемещении гашение будет один раз: когда диафрагма находится посередине.

$$25.5. r = \frac{4\lambda}{Da} = 4 \text{ мм.}$$

$$25.6. \lambda = \frac{a+b}{2ab} (r_2^2 - r_1^2) = 0,6 \text{ мкм.}$$

25.7. 0,7 мкм.

25.8. Слева — пятый, справа — второй.

25.9. $71^\circ 48'$.

25.10. $11^\circ 50'$; $24^\circ 12'$; $37^\circ 57'$; $55^\circ 04'$.

25.11. 0,36 мм.

25.12. 0,5 мкм.

25.13. 466,7 нм.

25.14. Не будут. Спектры различных порядков будут соприка-

саться при условии: $k\lambda_2 = (k+1)\lambda_1$; $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 5$. Следова-

тельно, частично перекрываться могут только спектры 6-го и более высоких порядков. Данная решетка дает для этого интервала только спектр 4-го порядка.

25.15. $d = 5,15 \text{ мкм}$; $l = 2,57 \text{ мм.}$

25.17. $0,42 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

25.18. $12 \cdot 10^3$; 50 нм.

25.19. 1:4.

$$25.20. \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = 1,15 \text{ рад/мкм.}$$

25.21. 26 м/мкм.

25.22. $D = 6 \text{ см.}$

25.23. 10^{-6} рад.

25.24. $3,87 \cdot 10^6$.

25.25. $R = 140,8 \text{ м.}$

$$25.26. U = \frac{hc}{e\lambda} = \frac{hc}{2de \sin \varphi} = 46,8 \text{ кВ.}$$

25.27. 293 пм.

25.28. 280 ам.

25.29 3° .

25.30. Определим постоянную решетки d . Объем каменной соли в количестве 1 кмоль $V_0 = \frac{M}{\rho}$. В объеме V_0 имеется $2N_A$ ионов

(N_A — постоянная Авогадро). Тогда объем, приходящийся на 1 ион, равен $V = \frac{M}{2\rho N_A}$. Постоянная решетки найдется

из условия $d = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho N_A}}$. Следовательно, $\lambda = d \sin \varphi = \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho N_A}} \sin \varphi = 56 \cdot 10^{-12} \text{ м}$; $\lambda = 56 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$

26.1. $27'$, 5.

26.3. $\alpha = 120^\circ$.

26.4. Угол между зеркалами должен быть 90° .

26.5. Зеркало вогнутое.

26.7. $F = 4 \text{ см.}$

26.8. $d = 30 \text{ см}$; $d' = 10 \text{ см.}$

26.9. Удалится от зеркала на 5 см.

26.10. 45 см.

26.11. $F = -30 \text{ см.}$

26.12. Изображение, получающееся после отражения лучей от обоих зеркал, совпадает с самим источником.

26.13. $R = ak(k-1) = 15 \text{ см}$, где k — угловое увеличение. Если $\frac{R}{2} > a$, то изображение мнимое.

26.14. По формуле сферического зеркала $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ радиус r окружности, по которой движется источник, и радиус

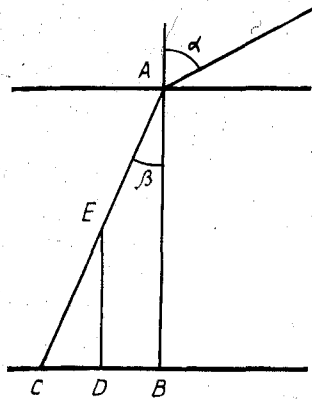


Рис. 27

r' окружности, по которой движется изображение, связаны соотношением $\frac{r}{r'} = \frac{d}{f}$. Следовательно, $r' = r \frac{f}{d} = \frac{rR}{2d-R}$. Центробежное ускорение a' , с которым движется изображение:

$$a' = \omega^2 r' = \left(\frac{v}{r}\right)^2 \frac{rR}{2d-R} = \frac{v^2 R}{r(2d-R)} = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

26.15. На рисунке 27 DC — тень от шеста ED ; $DC = ED \cdot \tan \beta$;

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_b; \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n_b} = \frac{0,5}{1,33} = 0,38; \beta = 22^\circ 30';$$

$$DC = ED \cdot \tan 22^\circ 30' = 38 \text{ см.}$$

26.16. $h = \frac{\Delta l}{\tan \beta_k - \tan \beta_\phi} = 23 \text{ мм}$, где Δl — расстояние между лучами, β_k — угол преломления для красных лучей, β_ϕ — для фиолетовых лучей.

26.17. $\tan \alpha = n$, где n — показатель преломления стекла.

26.18. $0,254 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

26.19. $67^\circ 33'$.

26.20. Второй луч тоже испытывает полное внутреннее отражение и не выйдет в воздух.

26.21. 1,2 м.

26.22. 4,2 см.

26.23. Изображение свечи приблизится к зеркалу.

26.24. На рисунке 28 AB — фронт плоской волны в воздухе,

$A'B'$ — фронт плоской волны в воде. $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_b; \sin \alpha = \frac{0,5}{1,33} =$

$$= 0,367; \beta = 22^\circ 10'; \cos \alpha = \frac{AB}{A'B}; A'B = \frac{AB}{\cos \alpha}; \sin \delta = \frac{A'B'}{A'B}.$$

Отсюда $A'B' = \frac{AB \cdot \sin \delta}{\cos \alpha}$; $\sin \delta = \sin (90^\circ - \beta)$. Следовательно,

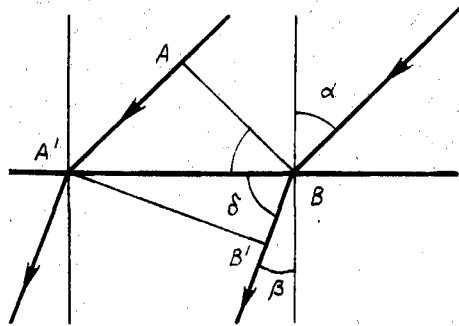


Рис. 28

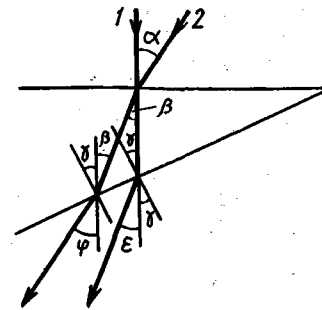


Рис. 29

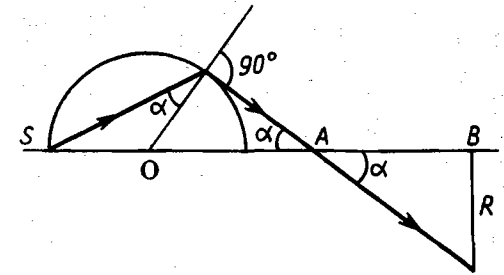


Рис. 30

$$A'B' = \frac{AB \cdot \cos \beta}{\cos \alpha} = 5,35 \text{ см.}$$

26.25. 7,4 м.

$$26.26. |SS'| = 2 \left(h + \frac{d}{n} \right) = 2 \left(h + \frac{3}{4} d \right).$$

26.27. Вследствие малости углов (рис. 29) по закону преломления $\frac{\sin (\epsilon + \gamma)}{\sin \gamma} = n$; $\frac{\epsilon + \gamma}{\gamma} = n$; $\epsilon = \gamma(n - 1)$;

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n; \frac{\alpha}{\beta} = n; \beta = \frac{\alpha}{n};$$

$$\frac{\sin (\varphi + \gamma)}{\sin (\beta + \gamma)} = n; \frac{\varphi + \gamma}{\beta + \gamma} = n;$$

$$\varphi = n\beta + (n - 1)\gamma = \alpha + \gamma(n - 1),$$

откуда $\varphi - \epsilon = \alpha$, т. е. луч 2 повернут относительно преломленного луча 1 на угол α .

26.28. $77^\circ 6'$.

26.30. $\alpha = 35^\circ$.

26.31. $n = 1,41$.

26.32. Положение пучка, выходящего из шара, определится явлением полного внутреннего отражения света (рис. 30):

$$n \sin \alpha \neq 1; \alpha = \arcsin \left(\frac{1}{n} \right) = 30^\circ; x = |AO| + |AB| =$$

$$= \frac{R}{\sin 30^\circ} + \frac{R}{\tan 30^\circ} = R(2 + \sqrt{3}); x = 3,73 R.$$

26.33. $\varphi = 2(\alpha - \beta) = 18^\circ$.

$$26.38. \frac{D_{\text{ст}}}{D_{\text{ан}}} = 0,35.$$

26.43. $f = 0,3 \text{ м}$; $H = 4 \text{ см}$.

$$26.44. F = \sqrt{l}.$$

26.45. 1,31.

26.46. $F_1 = F \frac{2(n_1 - 1)n_2}{2n_1 - n_2 - 1} = 50 \text{ см}$, где F_1 — фокусное расстояние лин-

зы в воде, n_1 — показатель преломления стекла, n_2 — показатель преломления воды, F — фокусное расстояние линзы в воздухе. $F_1 = 0,5$ м.

26.47. $F = 12$ см.

26.48. Экран нужно отодвинуть от линзы на расстояние, равное 1 см.

26.49. $h = \sqrt{H_1 H_2}$.

26.50. $R = \frac{2(F_k - F_\phi)}{\frac{1}{n_k - 1} - \frac{1}{n_\phi - 1}} = 0,5$ м, где F_k — фокусное расстояние

линзы для красных лучей, F_ϕ — для фиолетовых лучей, n_k, n_ϕ — показатели преломления линзы для красных и фиолетовых лучей соответственно.

26.51. Увеличится, так как увеличится радиус кривизны и уменьшится показатель преломления.

26.52. Так, чтобы совпали их главные фокусы. Если фокусное расстояние собирающей линзы меньше фокусного расстояния рассеивающей, решение невозможно.

26.54. Для положения наименьшего отклонения справедливо равенство

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}}, \quad (1)$$

где A — преломляющий угол призмы, δ — угол наименьшего отклонения. Если показатель преломления для некоторого луча $n + \Delta n$, то угол наименьшего отклонения $\delta + \Delta \delta$; Δn

и $\Delta \delta$ удовлетворяют равенству $\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\cos \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \Delta \delta$. Тогда

расстояние между соответствующими спектральными линиями $\Delta l = F \Delta \delta$, где F — фокусное расстояние линзы. Угол δ определяется из равенства (1):

$$\sin \frac{60 + \delta}{2} = 1,4881 \sin 30^\circ; \quad \delta = 36^\circ.$$

$$\Delta l = 2 \sin \frac{A}{2} F \cdot \frac{\Delta n}{\cos \frac{A + \delta}{2}} = 74 \text{ нм.}$$

26.55. Призма отклонит пучок лучей от главной оптической оси линзы на угол $\beta - \alpha$ (рис. 31), оставив его параллельным. Лучи соберутся в фокальной плоскости линзы в точке S на расстоянии x от оптической оси:

$$x = F \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta) = F \frac{\operatorname{tg} \beta - 1}{\operatorname{tg} \beta + 1}, \quad (1)$$

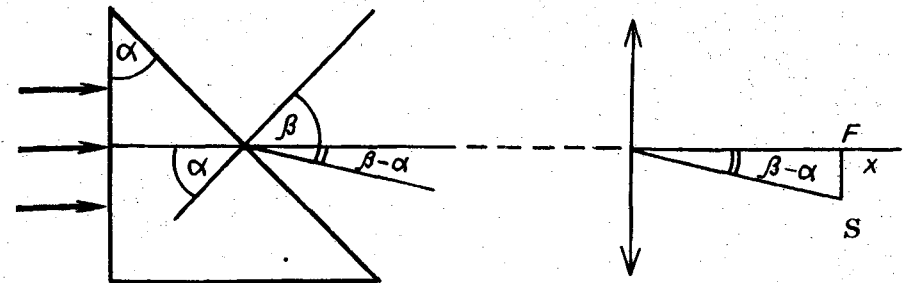


Рис. 31

$$\operatorname{tg} \alpha = 1, \text{ а } \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n, \text{ следовательно, } \sin \beta = \frac{n \sqrt{2}}{2},$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{n}{\sqrt{2 - n^2}}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), будем иметь $x = F \frac{n - \sqrt{2 - n^2}}{n + \sqrt{2 - n^2}}$.

26.56. $H = h \frac{F_2}{F_1} = 1,2$ см, где h — размер предмета.

26.57. $f_2 = 13,3$ см.

26.58. $f = \frac{F \left[2l \left(\frac{1}{F} - \frac{1}{d} \right) - 1 \right]}{2l \left(\frac{1}{F} - \frac{1}{d} \right) + \frac{F}{d} - 2}$.

Окончательное изображение будет мнимым, если S_2 находится между линзой и ее правым фокусом. Когда $l = 0$, изображение будет мнимым при $d < \frac{F}{2}$ и действительным при $d > \frac{F}{2}$.

26.59. При установившемся движении ускорение сосуда и жидкости в нем равно $a = g \sin \theta$. Поверхность жидкости в движущемся сосуде параллельна наклонной плоскости (рис. 32).

На основании закона преломления света $n \sin \theta = \sin \varphi$ имеем $\varphi = 60^\circ$; $\varphi - \theta = 30^\circ$. Проведем луч $ОН \parallel АВ$; лучи $ОН$ и $ВН$ собираются в одной точке фокальной плоскости. Смещение $НК$ луча $АВ$ равно $F \operatorname{tg}(\varphi - \theta) = 5,8$ см, где F — фокусное расстояние линзы.

26.60. $l = F_1 + F_2 = \frac{n}{n-1} (R_1 + R_2) = 75$ см, где F_1 и F_2 — фокусные расстояния поверхностей линзы, R_1 и R_2 — радиусы ее поверхностей, n — показатель преломления материала линзы, l — толщина линзы. Если вторая поверхность линзы вогнутая, то $l = F_1 - F_2 = \frac{n}{n-1} (R_1 - R_2) = 45$ см.

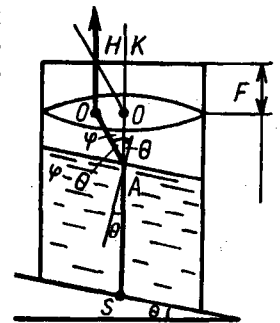


Рис. 32

- 26.61. Собирающие, дальность.
 26.62. + 2 дптр.
 26.63. На 3,5 дптр.
 26.64. $D_p = -5,3$ дптр; $D_c = 21,3$ дптр.
 26.65. 24-кратное.
 26.66. 150 раз.
 26.67. Нужно, чтобы фокусы объектива и окуляра совпали.
 26.68. $d = 0,3$ м; $\Gamma = 250$.
 26.69. $F = 1,5$ см; $l = 17,9$ см.
 26.70. $d = 70$ м.
 26.71. $h = 400$ м; $v = 80$ м/с.
 26.72. $F = 1,6$ м.
 26.73. $10^\circ 20'$.
 26.74. 12 раз.
 26.75. 10; изображение действительное.
 26.76. $x_1 = 20$ см; $x_2 = 80$ см от собирающей линзы.
 27.1. $E = 3,92 E_1$.
 27.2. 754 лм.
 27.3. Увеличится в 3 раза.
 27.4. 0,5 дптр.
 27.5. 6 лк.
 27.6. $l = \sqrt{r^2 (\sqrt[3]{4} - 1)} = 4$ м, где r — расстояние от лампы до центра площадки.
 27.7. В $8 \cdot 10^{-5}$ раз.
 27.8. В $1/4$ раза.
 27.9. 7,38 с.
 27.10. $\frac{E_0}{E} = 1\frac{7}{9}$, где E_0 — освещенность площадки при фотографировании в натуральную величину.
 27.11. $\frac{E}{E_0} = 4$, где E_0 — освещенность при фотографировании целиком.
 27.12. 50 с.
 27.13. 10^{-3} с.
 27.14. $\frac{S_{\partial_2}}{S_{\partial_1}} = \frac{25}{9}$; $\frac{D_{\partial_2}}{D_{\partial_1}} = \frac{5}{3}$,
 где S_{∂_2} и S_{∂_1} — площади диафрагмы, D_{∂_2} и D_{∂_1} — диаметры диафрагмы.
 27.15. 100 кд.
 27.16. $6 \cdot 10^6$ кд/м²; $3 \cdot 10^4$ кд/м².
 27.17. Сила света, создаваемая элементом площади $d\sigma$ в направлении α к нормали: $dJ = L d\sigma \cos \alpha$. Световой поток в телесном угле (рис. 33):

$$\alpha \Phi = L d\sigma \cos \alpha \frac{\Delta S \cos \alpha}{l^2}.$$

Освещенность на площадке ΔS , создаваемая элементом све-

тящейся поверхности $d\sigma$: $dE = \frac{L d\sigma \cos^2 \alpha}{l^2}$, но $l = \frac{l_0}{\cos \alpha}$, а

$$d\sigma = 2\pi r dr; r = l_0 \tan \alpha.$$

$$\text{Отсюда } dr = \frac{l_0}{\cos^2 \alpha} d\alpha; dE = 2\pi L \sin \alpha \cos \alpha d\alpha;$$

$$E = 2\pi L \int_0^\alpha \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = \pi L \sin^2 \alpha \Big|_0^\alpha = \pi L \frac{r_0^2}{r_0^2 + l_0^2};$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + l_0^2}}. E = 276 \text{ лк.}$$

Если считать диск точечным источником, то $E_1 = \frac{\pi L r_0^2}{l_0^2}$;

$$\frac{E_1 - E}{E} = \frac{r_0^2}{l_0^2} = 2,25\%.$$

$$28.1. \varphi = 56^\circ 12'.$$

28.2. Согласно формуле Френеля интенсивность отраженного луча

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{\sin^2 (\alpha - \beta)}{\sin^2 (\alpha + \beta)} + \frac{\tan^2 (\alpha - \beta)}{\tan^2 (\alpha + \beta)} \right],$$

где I_0 — интенсивность естественного света. При полной поляризации $\alpha_B + \beta = \frac{\pi}{2}$, где α_B — угол Брюстера. Тогда $I =$

$$= \frac{1}{2} I_0 \sin^2 (\alpha_B - \beta). \text{ Следовательно, } \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \sin^2 (\alpha_B - \beta), \text{ но}$$

$$\tan \alpha_B = n_{21}, \tan \alpha_B = 1,52; \alpha_B = 56^\circ 40'; \beta = 90^\circ - 56^\circ 46' = 33^\circ 20';$$

$$\alpha_B - \beta = 56^\circ 40' - 33^\circ 20';$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \sin^2 23^\circ 20' = \frac{1}{2} 0,396^2 \approx 0,078,$$

$$28.3. \alpha = 32^\circ.$$

$$28.4. 48^\circ 48'.$$

$$28.5. n = 1,43.$$

28.6. Коэффициент отражения $R = \frac{I_1}{I}$, где I_1 — интенсивность от-

раженного света, I — интенсивность падающего света,

$\alpha_B + \beta = \frac{\pi}{2}$. Следовательно, на основании формулы Френеля:

$$I' = I_1 = I_\perp \sin^2 (\alpha_B - \beta);$$

$$R = \frac{I_1}{I} \sin^2 (\alpha_B - \beta) = 0,5 \sin^2 (\alpha_B - \beta) = 0,04.$$

$$28.7. 0,9; 0,99.$$

$$28.8. 45^\circ.$$

$$28.9. 1/8.$$

$$28.10. \text{ В } 2 \text{ раза.}$$

$$28.11. \text{ В } 12 \text{ раз.}$$

$$28.12. I_{\text{ест}} = I_{\text{пол}}.$$

28.13. $d=14,7$ мкм.

28.14. 1,55.

28.15. $(n_e - n_0) \frac{x}{\lambda} = \frac{1}{4}$, где x — тол-
щина пластинки; $x =$
 $= 13,24$ мкм.

28.16. 5,7 мм.

28.17. 4,5 мм.

28.18. 250 кг.

28.19. 375 кг/м³.

28.20. $l=5$ см.

29.1. $\eta = -\frac{2B}{\lambda^3}$, где η — дисперсия;

$v = \frac{c\lambda^2}{A\lambda^2 + B}$, где v — фазовая скорость;

$u = \frac{c\lambda^2 (A\lambda^2 - B)}{(A\lambda^2 + B)^2}$, где u — групповая скорость.

29.2. $u = 17 \cdot 10^9$ см/с.

29.3. $v = 2,24 \cdot 10^8$ м/с; $u = 2,20 \cdot 10^8$ м/с.

29.4. $k = 0,14$ см⁻¹.

29.5. 0,8.

29.6. $k = 0,35$ см⁻¹.

29.7. 42 см; на 10%.

29.8. $k_2 = k_1 \frac{\lg N_2}{\lg N_1}$.

29.9. $n=8$.

29.10. 1%.

29.11. 0,67.

29.12. 0,52.

29.13. $k' = 0,06$ см⁻¹.

29.14. В 4 раза.

29.15. $v = 1,88$ м/с.

29.16. $2 \cdot 10^8$ м/с; $2,56 \cdot 10^8$ м/с.

30.1. $3 \cdot 10^8$ м/с.

30.2. $\Delta N = 0,10$.

30.3. $v = 0,141$ с, где c — скорость света.

30.4. На 13 нм.

30.5. $\lambda_0 = 600$ нм.

30.6. $4 \cdot 10^{-5}$ мкм.

30.7. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v n}{c} \cos \varphi$, где φ — угол между направлением наблюде-
ния и направлением движения.

30.8. $\Delta\lambda = -\frac{2Nv}{c}\lambda$.

30.9. $T = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \cdot \frac{4\pi R}{c} = 25$ суток, где R — радиус Солнца.

30.10. 1,98 км/с.

31.1. 1) 0,284 адж; 2) 0,361 адж; 3) 0,497 адж; 4) 0,02 адж.

31.2. В 36 раз.

31.3. Нет.

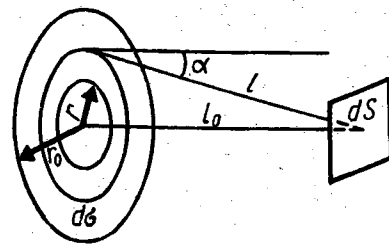


Рис. 33

31.4. 2 мкм — инфракрасная часть спектра.

31.5. 12,4 фм.

31.6. 1,07 ПГц; 1,18 ПГц; $E_2/E_1 = \lambda_1/\lambda_2 = 1,1$.

31.7. 1) $5,52 \cdot 10^{-36}$ кг и $1,1 \cdot 10^{-33}$ кг; 2) $9,6 \cdot 10^{-31}$ кг.

31.8. 2,42 пм.

31.9. 1,33 пм.

31.10. $5,33 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.

31.11. 1,99 фДж; $2,2 \cdot 10^{-32}$ кг; $6,625 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с; 99,4 фДж;

$1,1 \cdot 10^{-30}$ кг; $3,31 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с.

31.12. $2 \cdot 10^{15}$ м⁻²с⁻¹.

31.13. $n = \eta \frac{N\lambda t}{hc} = 3 \cdot 10^{17}$ с⁻¹.

31.14. $\frac{N_1}{N_2} = \frac{3}{4}$.

31.15. $T = \frac{2hc}{3k\lambda} = 96$ МК.

31.16. $A = hc/\lambda_0 = 4,2$ эВ.

31.17. Нет, так как энергия кванта равна 2,11 эВ и меньше
работы выхода электронов из металла на 0,29 эВ.

31.18. 235 нм; 262 нм; 276 нм; 305 нм; 631 нм.

31.19. 4,7 эВ; 4,5 эВ; 2,4 эВ; 2,3 эВ; 2,0 эВ.

31.20. $v = \sqrt{\frac{2hc}{m\lambda}} = 600$ Мм/с. Получился нелепый результат
 $v > c$, так как не учитывалась зависимость массы электрона
от скорости его движения.

31.21. $v = \sqrt{\frac{2(hc - A\lambda)}{m\lambda}} = 840$ км/с.

31.22. 213 нм.

31.23. 0,994 адж (6,2 эВ); 5 эВ; 0,192 адж; 650 км/с.

31.24. На 0,6 эВ.

31.25. $\lambda = \frac{hc}{eU} = 10$ нм.

31.26. 10,3 В.

31.27. 0,75 В.

31.28. $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

31.29. 3,5 мкПа; 7 мкПа.

31.30. 1) 46,6 мкПа; 2) 23,3 мкПа.

31.31. 37,5 МВт/м².

31.32. 4,7 мкПа; 2) $4 \cdot 10^{-16}$ кг.

31.33. $p = \frac{N}{cS} (1 + \rho) = 54$ мкПа.

31.34. $p = \frac{I}{c} (1 + \rho) = \frac{nh}{\lambda S} (1 + \rho) = 2,25$ мкПа.

31.35. $p = \frac{N}{4\pi r^2 c} (1 + \rho) = 24$ нПа.

31.36. $F = \frac{NS}{4\pi r^2 c} (1 + \rho) = 0,96$ мкН.

$$31.37. p_c/p_r = \frac{0,8N}{4\pi r^2 p_r c} = 1,9 \text{ раза.}$$

$$31.38. 39 \text{ м.}$$

$$31.39. 59,3 \text{ Мм/с.}$$

$$31.40. v = \sqrt{\frac{2hc}{m\lambda}} = 29,5 \text{ Мм/с.}$$

$$31.41. \text{ Из } \frac{mv^2}{2} = h\nu \text{ найдем } v = \frac{m_0 v^2}{2h\sqrt{1-\beta^2}} = 7,3 \text{ ЭГц.}$$

$$31.42. 6,61 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с.}$$

$$31.43. 41,4 \text{ пм.}$$

31.44. 1) Свободными являются те электроны, энергия связи которых значительно меньше энергии, передаваемой им распадающимися квантами. 2) В этом случае энергия связи электронов того же порядка, что и энергия налетающих квантов, следовательно, свободных электронов нет.

31.45. Чем сильнее связан электрон в атоме, тем меньше энергии он может получить от падающего кванта. В легких элементах электроны слабо связаны, в тяжелых — энергия связи существенно возрастает и относительное число сильно связанных электронов увеличивается.

$$31.46. 1,32 \text{ фм.}$$

31.47. $\Delta\lambda = 2,4 \text{ пм}$ не зависит от длины света. Относительное изменение длины волны: для видимого света $0,48 \cdot 10^{-5}$, для γ -лучей $0,48$.

$$31.48. \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = -2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2} = -1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

$$31.49. \Delta\lambda_m = 2\lambda_c; 4,8 \text{ пм и } 2,6 \text{ фм.}$$

$$31.50. \lambda' = \lambda + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2} = 59,9 \text{ пм.}$$

$$31.51. \text{ В } 2,8 \text{ раза.}$$

$$31.52. 26,7 \text{ пм.}$$

$$31.53. 90^\circ; \Delta E = h\nu - h\nu' = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right) = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} = 24 \text{ кэВ.}$$

$$31.54. \Delta E = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{\lambda + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

$$119 \text{ кэВ; } 185 \text{ кэВ; } 256 \text{ кэВ.}$$

$$31.55. E' = h\nu' = \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = \frac{E}{\lambda + 2\frac{E}{m_0 c^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = 0,43 \text{ МэВ;}$$

$$E_k = E - E' = 0,32 \text{ МэВ;}$$

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k^2 + 2m_0 c^2 (E_k + m_0 c^2)} = 0,42 \cdot 10^{-27} \text{ Н} \cdot \text{с.}$$

$$31.56. I_0/I = e^{\mu_m p d} = 1,94 \text{ раза.}$$

$$31.57. e^{\mu x} = I_0/I, \text{ откуда } x = \frac{\ln 2}{\rho \mu_m} = 0,9 \text{ см.}$$

$$31.58. 1000 \text{ К.}$$

$$31.59. 200 \text{ К.}$$

$$31.60. 3,85 \text{ ГДж.}$$

$$31.61. 52,5 \text{ Вт.}$$

$$31.62. \text{ Увеличится в } 16 \text{ раз.}$$

$$31.63. \Delta T = T_1 \left(\sqrt[4]{\frac{E_2}{E_1}} - 1 \right) = 126 \text{ К.}$$

31.64. $R_{s1} = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$ и $R_{s2} = \sigma (T_1^4 - T_3^4)$, где T_1 — температура котла с водой, T_2 — температура поверхности руки, T_3 — температура тела. $R_{s2}/R_{s1} = 1,24$ раза.

$$31.65. 21,8 \text{ ГДж.}$$

$$31.66. 0,7.$$

$$31.67. N = \sigma T^4 S = 1390 \text{ Вт.}$$

$$31.68. \text{ В } 3,3 \text{ раза.}$$

$$31.69. R_s = \sigma T^4 \text{ и } R_s = \frac{C^4 \pi R^2}{4\pi r^2}, \text{ где } R — \text{среднее расстояние от Земли}$$

до Солнца, r — радиус Солнца. Тогда $\sigma T^4 = \frac{CR^2}{r^2}$, откуда

$$T = \sqrt[4]{\frac{CR^2}{\sigma r^2}} = 5800 \text{ К.}$$

31.70. Нагревание прекратится в момент равенства поглощаемой

и излучаемой энергии: $CSt = \sigma T^4 St$, откуда $T = \sqrt[4]{\frac{C}{\sigma}} = 396 \text{ К.}$

31.71. Количество теплоты, теряемое шаром при понижении температуры на dT : $dQ = cm dT = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho c dT$, где ρ — плотность

железа. С другой стороны, $dQ = k\sigma T^4 S dt = 4\pi r^2 k\sigma T^4 dt$, где dt — время излучения, соответствующее понижению темпера-

туры на dT . $dt = \frac{c\rho r}{3k\sigma} T^{-4} dT$, откуда $t = \frac{c\rho r}{3k\sigma} \int_{T_1}^{T_2} T^{-4} dT =$

$$= \frac{c\rho r}{3k\sigma} \left(\frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right) = 1503 \text{ с (25 мин } 3 \text{ с).}$$

$$31.72. 20 \text{ мК.}$$

$$31.73. 0,5 \text{ мкм} — \text{область видимого спектра.}$$

$$31.74. \text{ Нельзя, так как } \lambda_m = 242 \text{ нм.}$$

$$31.75. 1,45 \text{ кДж.}$$

$$31.76. 1 \text{ мкм} — \text{инфракрасная область.}$$

$$31.77. 1870 \text{ Дж; } 20,8 \text{ пг.}$$

$$31.78. 7,5 \text{ кВт.}$$

$$31.79. \text{ В } 1,85 \text{ раза.}$$

$$31.80. \text{ В } 3,3 \text{ раза; } 565 \text{ К.}$$

$$31.81. 360 \text{ нм; в } 3,1 \text{ раза.}$$

$$31.82. R_s = \int_0^\infty f(\omega, T) d\omega = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 =$$

$$= 56 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) T^4 = \sigma T^4, \text{ где } x = \hbar \omega / (kT).$$

Преобразовав формулу Планка в $\varphi(\lambda, T)$ и продифференцировав ее по $\lambda \frac{d\varphi(\lambda, T)}{d\lambda} = 0$, получим: $T\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{4,965k} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = b$.

$$32.1. \lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_0 v} \sqrt{1 - v^2/c^2}; 36,4 \text{ нм и } 1,82 \text{ пм.}$$

$$32.2. 160 \text{ пм.}$$

$$32.3. 7,3 \text{ пм; } 6,9 \text{ пм.}$$

$$32.4. \text{ Из уравнений } \lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h \sqrt{1 - \beta^2}}{m_0 c \beta} \text{ и } E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

$$\text{имеем: } \lambda = \frac{\hbar c}{\sqrt{E_k(E_k + 2m_0 c^2)}} = 2,86 \text{ пм.}$$

$$32.5. \lambda = \frac{h}{\sqrt{3kmT}}; 73 \text{ пм; } 145 \text{ пм; } 28 \text{ пм.}$$

$$32.6. \text{ Для электрона и молекулы кислорода } E_k = \frac{\hbar^2}{2m\lambda^2}; 150 \text{ эВ; } 2,58 \text{ мэВ; } 16,4 \text{ пэВ.}$$

$$32.7. \lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar c}{\sqrt{(2m_0 c^2 + eU)eU}} = 1,4 \text{ пм.}$$

$$32.8. \lambda = \sqrt{\frac{\lambda_c \lambda_0}{2}} = 11 \text{ пм, где } \lambda_c \text{ — комптоновская длина волны.}$$

$$32.9. E_k = \frac{e^2 U^2}{2m_0 c^2} = 0,14 \text{ аДж.}$$

$$32.10. v = \frac{\hbar}{m\lambda} = \frac{k\hbar}{2dm \sin \varphi} = 2 \text{ Мм/с.}$$

$$32.11. U = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2med^2 \sin^2 \varphi} = 3,77 \text{ кВ.}$$

$$32.12. \Delta x \geq \frac{\hbar}{2m\Delta v}; \Delta x \geq 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$32.13. \Delta x \geq \frac{\hbar}{2\sqrt{3kmT}}; \Delta x \geq 8,2 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

$$32.14. \Delta v \geq \frac{\hbar}{2m\Delta x}; \Delta v \geq 0,6 \cdot 10^6 \text{ м/с; } \frac{\Delta v}{v_1} \geq 0,45.$$

$$32.15. \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \approx 4\pi\Delta x; \lambda = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$32.16. \Delta E \geq \frac{\hbar}{2\Delta t}; \Delta E \geq 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ эВ.}$$

$$32.17. \text{ Используя } p = \sqrt{2m\langle E_k \rangle} \text{ и } \Delta p_x \approx p, \text{ имеем: } \langle E_k \rangle \geq \frac{\hbar^2}{8m\Delta x^2}; \langle E_k \rangle \geq 1 \text{ эВ.}$$

$$32.20. \text{ При } x < 0 \text{ и } x > a \psi(0) = 0, \psi(a) = 0. E_n = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \text{ Для } n = 1 E_1 = 380 \text{ эВ.}$$

$$32.21. \Delta E = E_2 - E_1 = \frac{3\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}.$$

$$32.22. E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots \psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right).$$

$$32.23. \text{ Для } 0 \leq x \leq a \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + k^2 \psi_1 = 0 \left(k^2 = \frac{2m_0 E}{\hbar^2} \right); \text{ для } x > 0$$

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} - d^2 \psi_2 = 0 \left(d^2 = \frac{2m_0(U_0 - E)}{\hbar^2} \right). \text{ Решения: } \psi_1(x) = A \sin kx \text{ и } \psi_2(x) = B e^{-dx}. \text{ В точке } x = a \text{ получим: } A \sin ka = B e^{-da}; A k \cos ka = -B d e^{-da}. \text{ Тогда } \operatorname{tg} ka = -k/d, \text{ или } \sin ka = \pm \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m_0 a^2 U_0}} ka.$$

$$32.24. U(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a_1, \\ U_0 & \text{при } a_1 \leq x \leq a_2, \\ \infty & \text{при } x = 0 \text{ и } x = a_2. \end{cases}$$

Для $x < 0$ и $x > a_2 \psi_x = 0$; в точках $x = 0$ и $x = a_2 \psi(0) = 0$ и $\psi(a_2) = 0$.

Для $0 \leq x \leq a_1 \psi_1'' = -k^2 \psi_1$, а для $a_1 \leq x \leq a_2 \psi_2'' = -\kappa^2 \psi_2$, где $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ и $\kappa^2 = \frac{2m(E - U_0)}{\hbar^2}$. Решение ищем в виде $\psi = e^{\alpha x}$.

$$\psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx} \text{ и } \psi_2(x) = A_2 e^{i\kappa x} + B_2 e^{-i\kappa x}.$$

Так как $B_1 = -A_1$ и $B_2 = -A_2$, имеем:

$$A_1(e^{ika_1} - e^{-ika_1}) = A_2(e^{i\kappa a_1} - e^{-i\kappa a_1});$$

$$kA_1(e^{ika_1} + e^{-ika_1}) = \kappa A_2(e^{i\kappa a_1} + e^{-i\kappa a_1}),$$

откуда $\frac{1}{k} \operatorname{tg} ka_1 = \frac{1}{\kappa} \operatorname{tg} \kappa a_1$. Это и есть искомое уравнение.

$$\sqrt{1 - \frac{2mU_0}{k^2 \hbar^2}} \operatorname{tg} ka_1 = \operatorname{tg} \left(a_1 \sqrt{k^2 - \frac{2mU_0}{\hbar^2}} \right).$$

$$32.25. R = \left(\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^2, \text{ где } K_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}; K_2 = \frac{\sqrt{2m(E - U)}}{\hbar}.$$

$$\text{Тогда } R = \left(\frac{\sqrt{E} - \sqrt{E - U}}{\sqrt{E} + \sqrt{E - U}} \right)^2 = 0,005. \text{ Но } D = 1 - R = 0,995.$$

$$32.26. 843 \text{ пм.}$$

$$32.27. 154 \text{ пм.}$$

$$32.28. \text{ Co, Ni.}$$

$$32.29. \Delta\lambda = 92 \text{ пм.}$$

32.30. Линия K_α проявится лишь в том случае, если она не будет лежать за границей сплошного спектра, т. е. если

$$\lambda_\alpha > \hbar c / eU. \text{ Откуда } U > \frac{\hbar c}{e\lambda_\alpha}, \text{ или } U > \frac{3\hbar c R}{4e} (Z - \sigma)^2; U > 17,2 \text{ кВ.}$$

33.1. Из $\frac{mv_k^2}{r_k} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_k^2}$ имеем: $v_k^2 = e^2 / (4\pi m r_k \epsilon_0)$. Тогда $v_k = \frac{e^2}{2k\epsilon_0 h}$,

или $v_k = \frac{2,188}{k}$ Мм/с. При $k=1$ $v_1 = 2,19$ Мм/с, при $k=2$ $v_2 = 1,09$ Мм/с.

33.2. 670 пм.

33.3. $r_k = \frac{\epsilon_0 h^2 k^2}{\pi m e^2}$, или $r_k = k^2 \cdot 53,1$ пм (см. решение задачи 33.1).

При $k=1$ $r_1 = 53,1$ пм, при $k=2$ $r_2 \approx 212,4$ пм.

33.4. Зная v_k (см. решение задачи 33.1) и r_k (см. решение задачи 33.3), можно найти $a_k = \frac{v_k^2}{r_k} = \frac{\pi m e^6}{4\epsilon_0^3 k^4 h^4}$,

или $a_k \approx \frac{9,02 \cdot 10^{22}}{k^4}$ м/с².

При $k=1$ $a_1 = 9,02 \cdot 10^{22}$ м/с², при $k=2$ $a_2 = 0,56 \cdot 10^{22}$ м/с².

Такое чрезвычайно большое ускорение электронов должно сопровождаться сильным электромагнитным излучением. В результате энергия электронов будет весьма быстро убывать и электроны должны упасть на ядро. Таким образом, атом Резерфорда оказывается неустойчивым, время его жизни составляет всего лишь ничтожные доли секунды. В этом и заключается один из недостатков модели Резерфорда.

33.5. $k = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h v_k} = 3$.

33.6. При $k=1$ 81,7 нН, 511 ГВ/м; при $k=2$ 5,11 нН, 31,9 ГВ/м.

33.7. $n = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{E}{ch k}}} = 3$ раз.

33.8. $h\nu - h\nu' = \frac{mv'^2}{2}$ и $mv' + \frac{h\nu'}{c} = 0$, где ν' — частота рассеянного фотона, v' — скорость атома после излучения фотона.

Отсюда $h(\nu - \nu') = \frac{h^2}{2mc^2} \nu'^2$, $\frac{\Delta\nu}{\nu'^2} = \frac{h}{2mc^2}$, или $\Delta\nu = \Delta\left(\frac{c}{\nu}\right) = c\Delta\left(\frac{1}{\nu}\right) = \frac{c\Delta\nu}{\nu'^2} = \frac{h}{2mc} = 2$ фм.

33.9. $m_0 c^2 + h\omega = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$; $\frac{h\omega}{c} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}}$. Откуда $v = c \frac{h\omega}{m_0 c^2 + h\omega} = \frac{1}{m_0 c} \frac{h\omega}{1 + \frac{h\omega}{m_0 c^2}} \approx \frac{h\omega}{m_0 c} \left(1 - \frac{h\omega}{m_0 c^2}\right)$.

33.10. $r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 \lambda R k^2}{\pi m e (R\lambda - k^2)} = 475$ пм.

33.11. $E = E_p - E_k = \frac{m_0 c^2}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = 10,2$ эВ.

33.12. $E = E_k + E_p$. Найдем $E_p = \int_{\infty}^{r_k} F dr = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^{r_k} \frac{dr}{r^2} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_k} = -\frac{me^4}{4k^2\epsilon_0^2 h^2}$, или $E_p = \frac{27,1}{k^2}$ эВ; $E_k = \frac{mv_k^2}{2} = \frac{me^4}{8k^2\epsilon_0^2 h^2}$, или

$E_k = \frac{13,6}{k^2}$ эВ. Тогда $E = E_k + E_p = -\frac{me^4}{8k^2\epsilon_0^2 h^2}$, или $E = -\frac{13,6}{k^2}$ эВ.

33.13. $mv_k r_k = k \frac{h}{2\pi}$, откуда $2\pi r_k = k \frac{h}{mv_k} = k\lambda$. $\lambda_1 = 332$ пм и $\lambda_2 = 996$ пм; $2\pi r_1 = 332$ пм = λ_1 и $2\pi r_2 = 996$ пм (см. решение задач 33.1 и 33.2). Это значит, что стационарные электронные орбиты, вдоль которых укладывается целое число длин волн де Бройля. В квантовомеханической модели атома на смену боровским орбитам пришли пространственные стоячие волны. Каждой из таких волн отвечает определенная энергия и собственная частота. Вместо перехода с одной орбиты на другую происходит переход из одного состояния (которому соответствует определенная пространственная стоячая волна) в другое.

33.14. 121,2—90,9 нм.

33.15. 2,2 аДж.

33.16. 654,5 нм; 484,8 нм; 432,9 нм.

33.17. 1,002 мкм.

33.18. $1,095 \cdot 10^7$ м⁻¹.

33.19. Сериям Лаймана и Бальмера отвечают числа k , равные соответственно 1 и 2. Наибольшая длина волны в каждой серии соответствует числу $n = k + 1$. Поэтому $\frac{1}{\lambda_1} = R \left[\frac{1}{k_1^2} - \frac{1}{(k_1 + 1)^2} \right]$;

$$\frac{1}{\lambda_2} = R \left[\frac{1}{k_2^2} - \frac{1}{(k_2 + 1)^2} \right].$$

Отсюда $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\frac{1}{k_1^2} - \frac{1}{(k_1 + 1)^2}}{\frac{1}{k_2^2} - \frac{1}{(k_2 + 1)^2}} = 656,6$ нм.

33.20. $\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = 656,6$ нм.

33.21. $A = \frac{hRc}{k^2} = 5,47 \cdot 10^{-19}$ Дж = 3,42 эВ.

33.22. $\lambda_{1,2} = 121,6$ нм; $\lambda_{1,3} = 102,6$ нм; $\lambda_{2,3} = 656,3$ нм.

33.23. $-\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \leq -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} + E$. Отсюда $n \leq \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{8\epsilon_0^2 h^2 E}{me^4}}}$; $n = 5$.

Поскольку $\lambda = \frac{1}{R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)}$, то $\lambda_{2,3} = 656,3$ нм; $\lambda_{2,4} = 484,8$ нм; $\lambda_{2,5} = 434,0$ нм.

33.24. $n \leq \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{8\epsilon_0^2 h^2 E}{me^4}}}$; $n = 3$; $\lambda_{1,2} = 121,6$ нм; $\lambda_{1,3} = 102,6$ нм; $\lambda_{2,3} = 656,3$ нм.

$$34.1. j = \frac{I}{S} = nev_d, \text{ откуда } v_d = \frac{I}{neS} = 0,3 \text{ нА/см}^2.$$

$$34.2. v_d = bE = \frac{1}{neq} E = 0,68 \text{ м/с.}$$

$$34.3. \sigma = \frac{ne^2\tau}{m}, \text{ где } n = \frac{N_{AQ1}}{M}. \text{ Тогда } \tau = \frac{mM}{N_{AQ1}e^2} = 0,26 \cdot 10^{-13} \text{ с.}$$

$$34.4. 4,3 \cdot 10^{-15} \text{ с; } 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ м; } 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}).$$

$$34.5. \rho_p = \frac{1}{n_p e b_p} = 0,12 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

$$\rho_n = \frac{1}{n_n e b_n} = 0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

$$34.6. n = 1/[\rho e (b_n + b_p)] = 2,37 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

$$34.7. \lambda = hc/\Delta E = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$34.8. \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\exp(-\Delta E/kT_2)}{\exp(-\Delta E/kT_1)} = \exp\left[\frac{\Delta E(T_2 - T_1)}{kT_1 T_2}\right] = 17,5 \text{ раз.}$$

$$34.9. 2,37 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

$$34.10. n_n \approx n_g \sim T^{3/2} \exp(-\Delta E/2kT). \text{ Тогда } \frac{n''_n}{n'_n} = \frac{n''_g}{n'_g} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{\Delta E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = 3,67 \text{ раза.}$$

34.11. Для германия сурьма является донором, а индий — акцептором. Тогда $\sigma = n_n e b_n + n_p e b_p = 350 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

$$34.12. kT \gg \hbar\omega, e^{\hbar\omega/kT} \approx 1 + \hbar\omega/kT. \text{ Тогда } C \approx 3R.$$

$$34.13. kT \ll \hbar\omega \exp(\hbar\omega/kT) \gg 1. \text{ Тогда } C = 3R (\Theta_D/T)^2 \times \times \exp(-\Theta_D/T).$$

$$34.14. C = 0,92 \cdot 3R.$$

$$34.15. 3 \text{ кДж/моль.}$$

$$34.16. \frac{C_1}{C_2} = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{\Theta_D}{\Theta_D}\right) = 1,4 \text{ раза.}$$

$$34.17. \text{ При } T \gg \Theta_D, \hbar\omega/kT \gg 1, e^{\hbar\omega/kT} \approx 1 + \hbar\omega/kT. \text{ Тогда } U = U_0 + 3RT \text{ и } C = 3R.$$

$$34.18. \text{ При } T \ll \Theta_D, x_m = \hbar\omega/kT \approx \infty \text{ и } \int_0^\infty \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2} = \frac{4}{15} \pi^4.$$

$$\text{Тогда } C = \frac{12\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3.$$

$$34.19. C = \frac{12\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 = 21,3 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К}).$$

$$34.20. \Theta_E = \frac{\hbar\omega}{k} = \frac{\hbar v}{k}, \text{ где } v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m}}$$

(v — собственная частота колебаний атома, m — масса атома).

$$\text{Тогда } k_1 = \frac{4\pi^2 m k^2 \Theta_E^2}{\hbar^2} = 180 \text{ кг/с}^2.$$

$$34.21. \text{ При } E - b = 0,1 \text{ эВ, } f(E) = 1,79 \cdot 10^{-2}.$$

$$34.22. \text{ При } E = b, f(E) = 0,5.$$

$$34.23. E_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2 N_{AD}}{M}\right)^{2/3} = 2,05 \text{ эВ.}$$

$$34.24. N_s = nV = \frac{E_F^{3/2} (2m)^{3/2} V}{3\pi^2 \hbar^3} \text{ и } N_a = \frac{m}{M} N_A = \frac{\rho_1 V}{M} N_A.$$

$$\text{Тогда } \frac{N_s}{N_a} = \frac{E_F^{3/2} (2m)^{3/2} M}{3\pi^2 \hbar^3 \rho_1 N_A} = 1.$$

$$34.25. \langle E \rangle = \frac{3}{10} \frac{\hbar^2}{m} (3\pi^2 n)^{2/3} = 0,14 \text{ эВ.}$$

$$34.26. v_{\max} = \sqrt{2E_F/m} = 1,33 \text{ Мм/с.}$$

$$34.27. \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3}{5}} v_{\max} = 1,03 \text{ Мм/с.}$$

$$34.28. \text{ Из формулы } \frac{mv_F^2}{2} = E_F \text{ имеем: } v_F = \sqrt{\frac{\hbar^2 (3\pi^2 n)^{2/3}}{m}} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

$$34.29. \text{ При } T = 2 \text{ К } C_V = 42 \text{ Дж/(К} \cdot \text{м}^3), \text{ а при } T = 1000 \text{ К } C_V = 21 \text{ кДж/(К} \cdot \text{м}^3).$$

$$34.30. n = \frac{N_A}{V} = \frac{N_A}{A} \rho_1;$$

$$C_V = \frac{\pi^2}{2} \frac{k^2}{E_F} \frac{N_A}{A} \rho_1 T = 13,7 \text{ кДж/(К} \cdot \text{м}^3).$$

35.1. 1) 6 протонов и 4 нейтрона; 2) 6 протонов и 5 нейтронов; 3) 6 протонов и 6 нейтронов; 4) 6 протонов и 7 нейтронов; 5) 6 протонов и 8 нейтронов; 6) 6 протонов и 9 нейтронов.

35.2. В 6,2 раза.

$$35.3. \rho = \frac{Am_p}{V} = 2,62 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3.$$

$$35.4. R = R_c \sqrt[3]{\frac{\rho_c}{\rho_a}} = 12,2 \text{ км (см. задачу 35.3).}$$

$$35.5. 76,3 \text{ МэВ.}$$

$$35.6. 2,01650 \text{ а. е. м.; } 2,01414 \text{ а. е. м.}$$

35.7. 8,5 МэВ; 7,7 МэВ. Ядро ${}^3\text{H}$ более устойчиво, чем ${}^3\text{He}$.

35.8. 1786 МэВ; 1799 МэВ. Удельная энергия связи нуклонов в ${}^{235}_{92}\text{U}$ — 7,60 МэВ, а в ${}^{238}_{92}\text{U}$ — 7,56 МэВ. Поэтому ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ более устойчиво, чем ${}^{238}_{92}\text{U}$.

$$35.9. 6,47 \text{ МэВ.}$$

$$35.10. 1,12 \text{ МэВ; } 8,80 \text{ МэВ; } 8,43 \text{ МэВ; } 7,56 \text{ МэВ.}$$

$$35.11. 707 \text{ атомов.}$$

$$35.12. 1,66 \cdot 10^9 \text{ сут}^{-1}.$$

$$35.13. 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}; 0,74.$$

$$35.14. t = \frac{T}{\ln 2} \ln \frac{1}{1 - \Delta n} = 276 \text{ сут.}$$

$$35.15. 2 \text{ сут.}$$

$$35.16. T = \frac{N_0 \Delta t \ln 2}{\Delta N} = 5,02 \text{ сут.}$$

$$35.17. \Delta N = \frac{m N_A \ln 2}{AT} \Delta t = 1,68 \cdot 10^{15} \text{ распадов/с; } N = m \frac{N_A}{A} \exp(-\lambda t) = 1,19 \cdot 10^{22} \text{ атомов.}$$

$$35.18. \Delta N = \frac{m N_A \Delta t \ln 2}{AT} = 410 \text{ частиц/с.}$$

35.19. За 1 ч выделяется энергия $E = 70,6 \text{ ТэВ} = 11,3 \text{ Дж}$. Повышение температуры калориметра $\Delta T = \frac{E}{C} = 2,7 \text{ К}$.

35.20. $\Delta N = \frac{N \ln 2}{T} \Delta t = \frac{m N_A \Delta t \ln 2}{A T} = 1,24 \cdot 10^7 \text{ распадов/с}$;

$$a = \frac{1,24 \cdot 10^7}{3,7 \cdot 10^{10}} = 0,34 \text{ мКи.}$$

35.21. Из соотношений $\Delta N = \frac{\ln 2}{T} N \Delta t$, $\Delta N = n \frac{4\pi r^2}{S}$, $\frac{m}{N} = \frac{A_0}{N_A}$ определим $n = \frac{m N_A S \Delta t \ln 2}{4\pi r^2 A T} = 94$.

35.22. $6,4 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$.

35.23. $V = V_1 \frac{a_0}{a} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T} t\right) = 6000 \text{ см}^3$.

35.24. $M_{\text{св}} = \frac{A_{\text{св}} M_{\text{тор}}}{A_{\text{тор}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{\text{тор}}} t\right)\right] = 810 \text{ г}$.

35.25. 6; 4.

35.26. 8; 6.

35.27. Позитрон e^+ .

35.28. $^{226}_{88}\text{Ra}$.

35.29. $^{238}_{92}\text{U}$.

35.30. $^{206}_{82}\text{Pb}$.

35.31. $E = N \frac{mv}{2} \left(1 + \frac{m_a}{A}\right) t = 103 \text{ Дж}$.

35.32. $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow (^{18}_8\text{F}) \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$. Поглощается энергия 1,20 МэВ.

35.33. 1,56 МэВ.

35.34. $^9_4\text{Be} + ^1_1\text{H} \rightarrow (^{10}_5\text{B}) \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$; 4,36 МэВ.

35.35. 17,9 МэВ.

35.36. $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow 2^4_2\text{He}$; 18,14 МэВ.

35.37. 9,2 МэВ.

35.38. 1,56 МэВ; 7,28 МэВ.

35.39. 0,78 МэВ.

35.40. 17,6 МэВ; 4,0 МэВ; 4,8 МэВ; 5,02 МэВ.

35.41. $^{10}_5\text{B} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n}$;

$^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow (^{31}_{15}\text{P}) \rightarrow ^{30}_{15}\text{P} + ^1_0\text{n}$;

$^{24}_{12}\text{Mg} + ^4_2\text{He} \rightarrow (^{28}_{14}\text{Si}) \rightarrow ^{27}_{14}\text{Si} + ^1_0\text{n}$.

35.42. $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$; 2,79 МэВ.

35.43. 0,25.

35.44. $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{30}_{15}\text{P} + ^1_0\text{n}$; $^{30}_{15}\text{P} \rightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + ^1_1\text{e}$; 1,08 МэВ.

35.45. 234,04643 а. е. м.

35.46. Энергия, выделяющаяся при образовании одного ядра гелия, 27,3 МэВ. В гелии массой 1 г содержится $\frac{N_A}{A} =$

$= 1,506 \cdot 10^{23}$ атомов. Следовательно, энергия, выделяющаяся при образовании гелия массой 1 г, $41,1 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 658 \text{ ГДж}$.

35.47. $5,13 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 82 \text{ ГДж}$.

35.48. $5,13 \cdot 10^{32} \text{ эВ}$; $2,8 \cdot 10^6 \text{ кг}$; $1,68 \cdot 10^9 \text{ кг}$.

35.49. $1,54 \cdot 10^6 \text{ кг}$.

35.50. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{139}_{54}\text{Xe} + ^{95}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$.

35.51. 9,8 МэВ.

35.52. 30 г.

35.53. 44 г.

35.54. 15 МВт.

35.55. 72 г.

36.1. 0,4 и 9 ГэВ.

36.2. Пусть фотон передает электрону свою энергию. Тогда

$$h\nu + m_0 c^2 = \sqrt{p_0^2 c^2 + m_0^2 c^4}. \text{ Откуда } p_0 = \frac{h\nu}{c} \sqrt{1 + 2 \frac{m_0 c^2}{h\nu}} =$$

$$= p_0 \sqrt{1 + \frac{2m_0 c^2}{h\nu}} > p_0, \text{ что противоречит закону сохранения импульса.}$$

36.3. $E^2 - p^2 c^2 = E'^2 - p'^2 c^2$. До столкновения $E = E_1 + E_2 = E_k + E_0 + E_0 = E_k + 2E_0$, $p = p_1$, $p_2 = 0$. После столкновения $E' = E'_0$, $p' = 0$. Учитывая, что $p_1 = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + E_k) E_k}$ (см. решение задачи 7.19), получим: $(3E_0)^2 - 3E_0^2 = m_0^2 c^4$, откуда $m'_0 = \sqrt{6} m_0$.

36.4. 2,76 МэВ.

36.5. $(E + m_1 c^2)^2 - p^2 c^2 = (m_1 + 2m)^2 c^4$, где $p = E/c$ (после взаимодействия конечные частицы покоятся на пороге реакции). Равенство не выполняется при $m_1 = 0$.

36.6. $p = 2 \frac{E}{c} \cos \frac{\varphi}{2}$ и $E_k + 2mc^2 = 2E$, где p — импульс позитрона, m — его масса, E — энергия фотона, $p_1 = p_2 = \frac{E}{c}$ — импульс фотона. Для позитрона $(E_k + mc^2)^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$. Тогда $\cos \frac{\varphi}{2} = 1/\sqrt{1 + 2mc^2/E_k} = 0,651$; $\varphi = 98,5^\circ$.

36.7. 750 кэВ; 1,65 пм.

36.8. $4 \cdot 10^{-22} \text{ Н} \cdot \text{с}$.

36.9. Из $E_k = \frac{E - 2m_0 c^2}{2}$ и $E_k = mc^2 - m_0 c^2$ имеем:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{(2m_0 c^2)^2}{E^2}} = 2,82 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

36.10. $h\nu = 2m_0 c^2 + E_{e-} + E_{e+}$. Тогда $E_{e-} + E_{e+} = h\nu - 2m_0 c^2 = (3,02 - 1,02) \text{ МэВ} = 2,00 \text{ МэВ}$.

36.11. $m_0^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 - c^2 (p_1 + p_2)^2$, где $p_1 = E_1/c$ и $p_2 = E_2/c$.

$$\text{Тогда } m_0^2 c^4 = E_1^2 + 2E_1 E_2 + E_2^2 - E_1^2 - 2p_1 p_2 c^2 - E_2^2 = \\ = 2E_1 E_2 (1 - \cos \Theta) \sin \frac{\Theta}{2} = \frac{m_0^2 c^4}{2 \sqrt{E_1 E_2}}.$$

36.12. 67,5 МэВ.

36.13. 0,78 МэВ.

36.14. $\tau_0 = \frac{l}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2} = 2,1 \text{ мкс}$.

36.15. 32 нс, 5,76 м.

36.16. $\langle l \rangle = c \langle \tau_0 \rangle \sqrt{\frac{\eta(\eta+2)}{(\eta+1)^2}} = 3,3 \text{ м}$.

36.17. $\tau_0 = lmc/\sqrt{E_k (E_k + m_0 c^2)} = 1,45 \text{ нс}$.

36.18. 249 Мм/с.

36.19. Если $\frac{E}{m_0 c^2} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1$,

то $v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2} = 2,60 \cdot 10^8$ м/с.

36.20. Из $eU = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1\right)$ находим $v = 282$ Мм/с.

36.21. Радиус r найдем из формулы: $E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$

$$= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{(eBr/m_0 c)^2}{1 + (eBr/m_0 c)^2}}}$$

Отношение $\frac{v}{c}$ определяется из выражения $p = m_0 c \beta \sqrt{1 - \beta^2}$ ($p = eBr$ находим из равенства $\frac{mv}{r} = eBv$). $r = 10$ см.

36.22. $B = mv/(qr)$. Импульс частицы $p = mv$ и ее кинетическая энергия E_k связаны выражением $p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2m_0 c^2)}$. Тогда

да $B = \frac{1}{cqr} \sqrt{E_k (E_k + 2m_0 c^2)}$, где $E_k = \frac{1}{2} (h\nu - 2m_0 c^2) = 2,50$ МэВ. $B = 0,28$ Тл.

36.23. В 11,6 раза.

36.24. Из $A = enU$ и $E_k = mc^2 - m_0 c^2$ находим: $n = \frac{mc^2 - m_0 c^2}{2eU} = \frac{0,05 m_0 c^2}{2eU} = 784$ оборота.

36.25. Волны будут распространяться через кристалл (графит), не рассеиваясь при $\lambda > 2d$. Поэтому медленные нейтроны с импульсом $p < \frac{h}{2d}$ не будут испытывать рассеяние на атомах графита и пройдут через стержень. Быстрые нейтроны с импульсом $p \geq \frac{h}{2d}$ рассеются, покинут стержень и поглощаются.

1. Основные и дополнительные единицы Международной системы (СИ)

Величина	Единица	
	наименование	обозначение
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<i>Дополнительные единицы</i>		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

2. Некоторые характеристики Солнца, Земли и Луны

Физические параметры	Солнце	Земля	Луна
Масса, кг	$1,97 \cdot 10^{30}$	$5,96 \cdot 10^{24}$	$7,33 \cdot 10^{22}$
Радиус, м	$6,95 \cdot 10^8$	$6,37 \cdot 10^6$	$1,74 \cdot 10^6$
Средняя плотность, кг/м ³	1400	5518	3350
Среднее расстояние от Земли, км	$1,496 \cdot 10^8$	—	384440

3. Плотность (кг/м³)

Газы (при температуре 0°C и нормальном атмосферном давлении)

Водород	0,08988	Кислород	1,429
Воздух	1,293	Углекислый газ	1,977
<i>Жидкости</i>			
Бензол	880	Керосин	800
Вода (+4°C)	1000	Кровь	1050
Глицерин	1200	Ртуть	13600
Золото	17200	Серебро	9800
Касторовое масло	950	Спирт	790

Твердые тела			
Алюминий	2600	Олово	7100
Железо	7900	Платина	21400
Золото	19300	Пробка	200
Каменная соль	2200	Свинец	11300
Латунь	8400	Серебро	10500
Лед	900	Сталь	7700
Медь	8600	Стекло	2700
Никель	8800		

4. Плотность воды при различных температурах

Температура, °C	20	30	40	50	60	70	80
Плотность, кг/м ³	998	996	992	988	983	978	972

5. Модуль упругости (ГПа)

Алюминий	70	Медь	120
Дерево	10	Свинец	17
Дюралюминий	75	Сталь (железо)	210
Кирпич	10	Чугун	100
Латунь	90	Каучук	0,008

6. Скорость звука (м/с)

Алюминий	5100	Железо	5300
Вода	1450	Кирпич	3650
Воздух (0°C)	332		

7. Коэффициенты расширения (K⁻¹)

Линейное расширение			
Алюминий	$2,4 \cdot 10^{-5}$	Медь	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Железо (сталь)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	Стекло	$1 \cdot 10^{-5}$
Латунь	$1,9 \cdot 10^{-5}$	Цинк	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Объемное расширение			
Вода (5—10°C)	0,000053	Вода (40—60°C)	0,000458
Вода (10—20°C)	0,000150	Вода (80—80°C)	0,000587
Вода (20—40°C)	0,000302	Ртуть (18°C)	0,00019

8. Удельная теплоемкость

Твердые и жидкие тела			
Вещество	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Вещество	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Алюминий	896	Лед	2100
Бензин (50°C)	2095	Масло трансформаторное (20°C)	1800
Висмут	130	Медь	395
Вода (20°C)	4190	Ртуть	138
Вольфрам	195	Свинец	131
Железо (сталь)	460	Спирт	2510
Латунь	386		
Газы и пары			
Вещество	C_p , Дж/(кг·К)	C_v , Дж/(кг·К)	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
Аммиак (NH ₃)	2140	1630	1,31
Аргон (Ar)	532	320	1,66
Воздух	1020	729	1,40
Гелий (He)	5240	3140	1,66
Кислород (O ₂)	913	649	1,40
Метан (CH ₄)	2373	1854	1,28
Пары воды (H ₂ O)	1820	1380	1,32
Углекислый газ (CO ₂)	848	654	1,30

9. Диаметры молекул и атомов (нм)

Азот (N ₂)	0,31	Кислород (O ₂)	0,29
Аргон (Ar)	0,29	Оксид углерода (CO)	0,32
Водород (H ₂)	0,23	Углекислый газ (CO ₂)	0,33
Водяной пар (H ₂ O)	0,26	Хлор (Cl ₂)	0,37
Гелий (He)	0,19		

10. Вязкость жидкостей, газов и паров

Вещество	Температура, °C	Вязкость, мкПа·с	Вещество	Температура, °C	Вязкость, мкПа·с
Азот	0	16,7	Пары воды	0	8,7
Вода	20	1004	Углекислый газ	0	13,7
Воздух	21,6	18,4	Хлор	0	12,9
Гелий	0	18,6			
Кислород	0	19,2			

11. Постоянные Ван-дер-Ваальса

Вещество	$a, \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$	$b, 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	Вещество	$a, \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$	$b, 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
Азот	0,136	4	Кислород	0,137	3
Аргон	0,132	3	Углекислый газ	0,364	4,3
Вода	0,554	3			

12. Критические значения температуры и давления

Вещество	$T_k, \text{К}$	$p_k, \text{МПа}$	Вещество	$T_k, \text{К}$	$p_k, \text{МПа}$
Азот	126	3,4	Водяной пар	647	22,0
Аргон	151	4,87	Гелий	5,2	0,23
Бензол	562	4,8	Кислород	154	5,07
Водород	33	1,3	Углекислый газ	304	7,4

13. Поверхностное натяжение жидкостей при температуре 20°C

Вещество	Поверхностное натяжение, мН/м	Вещество	Поверхностное натяжение, мН/м
Анилин	43	Касторовое масло	33
Бензол	30	Керосин	30
Вода	73	Мыльный раствор воды	45
Вода (70°C)	64	Ртуть	500
Глицерин	64	Серебро (распл. 960°C)	780
Золото (распл. 1070°C)	610	Спирт	22

14. Теплопроводность веществ

Вещество	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Вещество	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Алюминий	205	Медь	390
Аргон	0,16	Накипь котельная	2,3
Асбест	0,14	Пробка	0,035
Висмут	10	Сажа	0,25
Вода	0,58	Свинец	34,8
Воздух	0,026	Смола	0,52
Дерево (поперек волокон)	0,17	Стекло	0,74
Железо (сталь)	62	Эбонит	0,16
Кирпичная кладка	0,84		

15. Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-30	37,3	0,33	12	1402,3	10,7
-29	41,3	0,37	13	1519,6	11,4
-28	46,7	0,41	14	1598,3	12,1
-27	50,7	0,46	15	1704,9	12,8
-26	57,3	0,51	16	1816,9	13,6
-25	62,7	0,55	17	1936,8	14,5
-24	69,3	0,66	18	2063,5	15,4
-23	77,3	0,68	19	2196,8	16,3
			20	2338,1	17,3
-22	85,3	0,73			
-21	93,3	0,80	21	2486,0	18,3
-20	102,6	0,85	22	2643,3	19,4
-19	113,3	0,96	23	2808,6	20,6
-18	125,3	1,05	24	2983,3	21,8
-17	137,3	1,15	25	3167,2	23,0
-16	150,6	1,27	26	3360,5	24,4
-15	165,3	1,38	27	3567,1	25,8
-14	181,3	1,51	28	3779,1	27,2
-13	198,6	1,65	29	4004,3	28,7
-12	217,3	1,80	30	4241,6	30,3
-11	237,3	1,96	31	4603,2	31,9
-10	259,9	2,14	32	4753,6	33,9
-9	283,9	2,33	33	5029,4	35,7
-8	337,2	2,54	34	5316,7	37,6
-7	351,9	2,76	35	5622,6	39,6
-6	367,9	2,99	36	5939,8	41,8
-5	401,2	3,24	37	6274,4	44,0
-4	437,2	3,51	38	6623,7	46,3
-3	475,9	3,81	39	6990,3	48,7
-2	517,2	4,13	40	7374,2	51,2
-1	562,5	4,47	45	9581,6	65,4
0	610,5	4,84	50	12330,3	83,0
1	656,1	5,22	55	15729,4	104,3
2	758,4	5,60	60	19915,0	130
3	797,3	5,98	65	24993,8	161
4	812,1	6,40	70	31152,2	198
5	871,1	6,84	75	38577,0	242
6	934,4	7,3	80	47334,8	293
7	1001,1	7,8	85	57798,9	354
8	1073,1	8,3	90	70089,1	424
9	1147,7	8,8	95	84498,9	505
10	1227,7	9,4	100	101303,0	598
11	1300,7	10,0			

16. Температура плавления и удельная теплота плавления

Вещество	Температура плавления, °С (при 0,1 МПа)	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Вещество	Температура плавления, °С (при 0,1 МПа)	Удельная теплота плавления, кДж/кг
Алюминий	660	387	Ртуть	— 38,9	11,7
Железо	1535	272	Свинец	327	25
Лед	0	334	Серебро	960	80
Медь	1083	174			
Олово	232	60	Цинк	420	118

17. Диэлектрическая проницаемость веществ

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Вода	81	Слюда	6
Керосин	2	Стекло	5,5—10
Масло трансформаторное	2,2	Фарфор	6
Парафин	2	Эбонит	2,6
Парафинированная бумага	3,7		

18. Удельное сопротивление и температурный коэффициент (при 20°С)

Проводник	Удельное сопротивление, нОм·м	Температурный коэффициент, К ⁻¹	Проводник	Удельное сопротивление, нОм·м	Температурный коэффициент, К ⁻¹
Алюминий	28	0,0038	Никелин	400	0,000017
Вольфрам	55	0,0051	Нихром	980	0,00026
Графит	8000		Ртуть	958	0,0009
Железо	98	0,0062	Свинец	211	0,0042
Константан	480	0,00002	Сталь	120	0,006
Медь	17,2	0,0043	Уголь	40	—0,0008

19. Подвижность ионов

Водные растворы (мм ² /(В·с))			
H ⁺	0,326	OH ⁻	0,18
Na ⁺	0,045	F ⁻	0,049
K ⁺	0,067	Cl ⁻	0,068
Ag ⁺	0,056	Br ⁻	0,07
NH ⁺	0,067	NO ₃ ⁻	0,064

Газы (при нормальных условиях) (см²/(В·с))

Вещество	Положительные ионы	Отрицательные ионы	Вещество	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	1,3	1,8	Кислород	1,3	1,8
Водород	5,4	7,4	Оксид углерода	1,0	1,1
Воздух	1,4	1,9	Хлор	0,6	0,5

20. Работа ионизации (эВ)

Азот	15,8	Кислород	13,56
Аргон	15,7	Натрий	5,12
Водород	15,4	Неон	21,48
Гелий	24,45	Углекислый газ	14,4

21. Электрохимические эквиваленты (мг/Кл)

Алюминий (Al ⁺⁺⁺)	0,093	Медь (Cu ⁺⁺)	0,329
Висмут (Bi ⁺⁺⁺)	0,719	Никель (Ni ⁺⁺)	0,304
Железо (Fe ⁺⁺)	0,289	Никель (Ni ⁺⁺⁺)	0,203
Железо (Fe ⁺⁺⁺)	0,193	Серебро (Ag ⁺)	1,118
Золото (Au ⁺)	2,043	Хром (Cr ⁺⁺⁺)	0,180
Золото (Au ⁺⁺)	0,681	Цинк (Zn ⁺⁺)	0,338
Медь (Cu ⁺)	0,660		

22. Показатели преломления (средние для видимых лучей)

Алмаз	2,42	Лед (— 4°С)	1,31
Вода (20°С)	1,33	Скипидар (20°С)	1,47
Кварц	1,54	Стекло	1,5

23. Работа выхода электронов из металлов (эВ)

Вольфрам	4,5	Никель	5,0
Железо	4,74	Платина	5,29
Золото	4,68	Ртуть	4,52
Калий	2,0	Рубидий	2,13
Литий	2,4	Серебро	4,74
Магний	3,46	Тантал	4,07
Медь	4,47	Цезий	1,97
Молибден	4,2	Цинк	4,0
Натрий	2,3		

24. Периоды полураспада некоторых радиоактивных веществ

Висмут $^{210}_{83}\text{Bi}$	5,02 сут	Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 сут
Иридий $^{192}_{77}\text{Ir}$	75 сут	Стронций $^{90}_{38}\text{Sr}$	28 лет
Кальций $^{45}_{20}\text{Ca}$	164 сут	Торий $^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ лет
Натрий $^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 ч	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ лет
Полоний $^{210}_{84}\text{Po}$	138 сут	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Радий $^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 лет		

25. Массы некоторых изотопов (а. е. м.)

Изотоп	Масса	Изотоп	Масса
^1_1H	1,00783	$^{16}_8\text{O}$	15,99491
^2_1D	2,01410	$^{17}_8\text{O}$	16,99913
^3_1T	3,01605	$^{19}_9\text{F}$	18,99840
^4_2He	3,01608	$^{20}_{10}\text{Ne}$	19,99244
^6_2He	4,00260	$^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977
^7_3Li	6,01512	$^{24}_{12}\text{Mg}$	23,99097
^9_3Li	7,01600	$^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154
^9_4Be	7,01693	$^{28}_{14}\text{Si}$	27,9769
$^{10}_4\text{Be}$	8,00531	$^{29}_{15}\text{P}$	27,9769
$^{11}_5\text{B}$	9,01218	$^{30}_{16}\text{S}$	29,97377
$^{12}_5\text{B}$	10,01294	$^{31}_{17}\text{Cl}$	30,97376
$^{13}_6\text{C}$	11,00930	$^{56}_{26}\text{Fe}$	55,9349
$^{14}_6\text{C}$	12,0	$^{59}_{27}\text{Co}$	58,93320
$^{14}_7\text{N}$	13,00574	$^{60}_{28}\text{Ni}$	59,9308
$^{15}_7\text{N}$	14,00307	$^{131}_{54}\text{Xe}$	130,9051
		$^{235}_{92}\text{U}$	235,0493
		$^{238}_{92}\text{U}$	238,05353

26. Некоторые постоянные числа и приближенные формулы

Постоянные числа	Приближенные формулы (при $a < 1$)
$\pi = 3,1416$	$(1 \pm a)^n \approx 1 \pm na$
$\pi^2 = 9,8696$	$e^a \approx 1 + a$
$\sqrt{\pi} = 1,7725$	$\ln(1 + a) \approx a$
$e = 2,7183$	$\sin a \approx a$
$\lg e = 0,4343$	$\cos a \approx 1 - a^2/2$
$\ln 10 = 2,3026$	$\lg a \approx a$

27. Таблица производных и интегралов

Функция	Производная	Функция	Производная	Функция	Производная
x^n	nx^{n-1}	$\sin x$	$\cos x$	$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\cos x$	$-\sin x$	$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x^n}$	$-\frac{n}{x^{n+1}}$	$\operatorname{tg} x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\operatorname{arctg} x$	$\frac{1}{1+x^2}$
\sqrt{x}	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$	$\operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$	$\operatorname{arccotg} x$	$-\frac{1}{1+x^2}$
e^x	e^x	\sqrt{u}	$\frac{u'}{2\sqrt{u}}$	$\operatorname{sh} x$	$\operatorname{ch} x$
e^{ax}	ae^{ax}	$\ln u$	$\frac{u'}{u}$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{sh} x$
a^x	$a^x \ln a$	$\frac{u}{v}$	$\frac{vu' - v'u}{v^2}$	$\operatorname{th} x$	$\frac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$			$\operatorname{cth} x$	$-\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$

$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} (n \neq -1)$	$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x$	$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x$
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int e^x dx = e^x$
$\int \cos x dx = \sin x$	$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x$
$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln \cos x$	$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x$
$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln \sin x$	$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2-1}} = \ln(x + \sqrt{x^2-1})$
Интегрирование «по частям»: $\int u \cdot dv = uv - \int v du$	

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
0,00	1,0000	1,0000	2,00	7,3891	0,1353
0,05	1,0513	0,9512	2,05	7,7679	0,1287
0,10	1,1052	0,9048	2,10	8,1662	0,1225
0,15	1,1618	0,8607	2,15	8,5849	0,1165
0,20	1,2214	0,8187	2,20	9,0250	0,1108
0,25	1,2840	0,7788	2,25	9,4877	0,1054
0,30	1,3499	0,7408	2,30	9,9742	0,1003
0,35	1,4191	0,7047	2,35	10,486	0,09537
0,40	1,4918	0,6703	2,40	11,023	0,09072
0,45	1,5683	0,6376	2,45	11,588	0,08629
0,50	1,6487	0,6065	2,50	12,182	0,08208
0,55	1,7333	0,5770	2,55	12,807	0,07808
0,60	1,8221	0,5488	2,60	13,464	0,07427
0,65	1,9155	0,5221	2,65	14,154	0,07065
0,70	2,0138	0,4966	2,70	14,880	0,06721
0,75	2,1170	0,4724	2,75	15,643	0,06393
0,80	2,2255	0,4493	2,80	16,445	0,06081
0,85	2,3396	0,4274	2,85	17,288	0,05784
0,90	2,4596	0,4066	2,90	18,174	0,05502
0,95	2,5857	0,3867	2,95	19,106	0,05234
1,00	2,7183	0,3679	3,00	20,086	0,04979
1,05	2,8577	0,3499	3,05	21,115	0,04736
1,10	3,0042	0,3329	3,10	22,198	0,04505
1,15	3,1582	0,3166	3,15	23,336	0,04285
1,20	3,3201	0,3012	3,20	24,533	0,04076
1,25	3,4903	0,2865	3,25	25,790	0,03877
1,30	3,6693	0,2725	3,30	27,113	0,03688
1,35	3,8574	0,2592	3,35	28,503	0,03508
1,40	4,0552	0,2466	3,40	29,964	0,03337
1,45	4,2631	0,2346	3,45	31,500	0,03175
1,50	4,4817	0,2231	3,50	33,115	0,03020
1,55	4,7115	0,2123	3,55	34,813	0,02872
1,60	4,9530	0,2019	3,60	36,598	0,02732
1,65	5,2070	0,1921	3,65	38,475	0,02599
1,70	5,4739	0,1827	3,70	40,447	0,02472
1,75	5,7546	0,1738	3,75	42,521	0,02352
1,80	6,0496	0,1653	3,80	44,701	0,02237
1,85	6,3598	0,1572	3,85	46,993	0,02128
1,90	6,6859	0,1496	3,90	49,402	0,02024
1,95	7,0287	0,1423	3,95	51,935	0,01925

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
4,00	54,598	0,01832	6,0	403,43	0,00248
4,05	57,397	0,01742	6,1	445,86	0,00224
4,10	60,340	0,01657	6,2	492,75	0,00203
4,15	63,434	0,01576	6,3	544,57	0,00184
4,20	66,686	0,01500	6,4	601,85	0,00166
4,25	70,105	0,01426	6,5	665,14	0,001503
4,30	73,700	0,01357	6,6	735,10	0,001360
4,35	77,478	0,01291	6,7	812,41	0,001231
4,40	81,451	0,01228	6,8	897,85	0,001114
4,45	85,627	0,01168	6,9	992,27	0,001008
4,50	90,017	0,01111	7,0	1096,6	0,000912
4,55	94,632	0,01057	7,1	1212,2	0,000825
4,60	99,484	0,01005	7,2	1339,4	0,000747
4,65	104,58	0,00956	7,3	1480,5	0,000676
4,70	109,95	0,00910	7,4	1636,0	0,000611
4,75	115,58	0,00865	7,5	1808,0	0,000553
4,80	121,51	0,00823	7,6	1998,2	0,000500
4,85	127,74	0,00783	7,7	2208,3	0,000453
4,90	134,29	0,00745	7,8	2440,6	0,000410
4,95	141,17	0,00708	7,9	2697,3	0,000371
5,00	148,41	0,00674	8,0	2981,0	0,000335
5,05	156,02	0,00641	8,1	3294,5	0,000304
5,10	164,02	0,00610	8,2	3641,0	0,000275
5,15	172,43	0,00580	8,3	4023,9	0,000249
5,20	181,27	0,00552	8,4	4447,1	0,000225
5,25	190,57	0,00525	8,5	4914,8	0,000203
5,30	200,34	0,00499	8,6	5431,7	0,000184
5,35	210,61	0,00475	8,7	6002,9	0,000167
5,40	221,41	0,00452	8,8	6634,2	0,000151
5,45	232,76	0,00430	8,9	7332,0	0,000136
5,50	244,69	0,00409	9,0	8103,1	0,000123
5,55	257,24	0,00389	9,1	8955,3	0,000112
5,60	270,43	0,00370	9,2	9897,1	0,000101
5,65	284,29	0,00352	9,3	10938	0,000091
5,70	298,87	0,00335	9,4	12088	0,000083
5,75	314,19	0,00318	9,5	13360	0,000075
5,80	330,30	0,00303	9,6	14765	0,000068
5,85	347,23	0,00288	9,7	16318	0,000061
5,90	365,04	0,00274	9,8	18034	0,000055
5,95	383,75	0,00261	9,9	19930	0,000050
			10,0	22026	0,000045

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИ

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	Г Р У П П Ы					
		I	II	III	IV		
1	1	H ¹ ВОДОРОД 1,00794					
2	2	Li ³ ЛИТИЙ 6,941	Be ⁴ БЕРИЛЛИЙ 9,01218	B ⁵ БОР 10,81	C ⁶ УГЛЕРОД 12,011		
3	3	Na ¹¹ НАТРИЙ 22,98977	Mg ¹² МАГНИЙ 24,305	Al ¹³ АЛЮМИНИЙ 26,98154	Si ¹⁴ КРЕМНИЙ 28,0855		
4	4	K ¹⁹ КАЛИЙ 39,0983	Ca ²⁰ КАЛЬЦИЙ 40,08	Sc ²¹ СКАНДИЙ 44,9559	Ti ²² ТИТАН 47,90		
	5	Cu ²⁹ МЕДЬ 63,546	Zn ³⁰ ЦИНК 65,38	Ga ³¹ ГАЛЛИЙ 69,72	Ge ³² ГЕРМАНИЙ 72,59		
5	6	Rb ³⁷ РУБИДИЙ 85,4678	Sr ³⁸ СТРОНЦИЙ 87,62	Y ³⁹ ИТРИЙ 88,9058	Zr ⁴⁰ ЦИРКОНИЙ 91,22		
	7	Ag ⁴⁷ СЕРЕБРО 107,8682	Cd ⁴⁸ КАДМИЙ 112,41	In ⁴⁹ ИНДИЙ 114,82	Sn ⁵⁰ ОЛОВО 118,69		
6	8	Cs ⁵⁵ ЦЕЗИЙ 132,9054	Ba ⁵⁶ БАРИЙ 137,33	La-Lu ⁵⁷⁻⁷¹ *	Hf ⁷² ГАФИЙ 178,49		
	9	Au ⁷⁹ ЗОЛОТО 196,9665	Hg ⁸⁰ РУТУТЬ 200,59	Tl ⁸¹ ТАЛЛИЙ 204,37	Pb ⁸² СВИНЕЦ 207,2		
7	10	Fr ⁸⁷ ФРАНЦИЙ [223]	Ra ⁸⁸ РАДИЙ 226,0254	Ac-(Lr) ⁸⁹⁻¹⁰³ **	Ku ¹⁰⁴ КУРЧАТОВИЙ [261]		
ВЫШНИЕ ОКСИДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂		
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH ₄		
*	ЛАНТАНОИДЫ	La ⁵⁷ ЛАНТАН 138,9055	Ce ⁵⁸ ЦЕРИЙ 140,12	Pr ⁵⁹ ПРАЗЕОДИМ 140,9077	Nd ⁶⁰ НЕОДИМ 144,24	Pm ⁶¹ ПРОМЕТИЙ [145]	Sm ⁶² САМАРИЙ 150,4
**	АНТИНОИДЫ	Ac ⁸⁹ АКТИНИЙ [227]	Th ⁹⁰ ТОРИЙ 232,0381	Pa ⁹¹ ПРОТАКТИНИЙ 231,0359	U ⁹² УРАН 238,029	Np ⁹³ НЕПТУНИЙ 237,0482	Pu ⁹⁴ ПЛУТОНИЙ [244]

ЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Э Л Е М Е Н Т О В								
V	VI	VII	VIII					
		(H)	² He ГЕЛИЙ 4,00260					
7 N АЗОТ 14,0067	8 O КИСЛОРОД 15,9994	9 F ФТОР 18,998403	10 Ne НЕОН 20,179					
15 P ФОСФОР 30,97376	16 S СЕРА 32,06	17 Cl ХЛОР 35,453	18 Ar АРГОН 39,948					
V 23 ВАНАДИЙ 50,9415	Cr 24 ХРОМ 51,996	Mn 25 МАРГАНЕЦ 54,9380	Fe 26 ЖЕЛЕЗО 55,847	Co 27 КОБАЛЬТ 58,9332	Ni 28 НИКЕЛЬ 58,70			
33 As МЫШЬЯК 74,9216	34 Se СЕЛЕН 78,96	35 Br БРОМ 79,904	36 Kr КРИПТОН 83,80					
Nb 41 НИОБИЙ 92,9064	Mo 42 МОЛИБДЕН 95,94	Tc 43 ТЕХНЕЦИЙ 98,9062	Ru 44 РУТЕНИЙ 101,07	Rh 45 РОДИЙ 102,9055	Pd 46 ПАЛЛАДИЙ 106,4			
51 Sb СУРЬМА 121,75	52 Te ТЕЛЛУР 127,60	53 I ИОД 126,9045	54 Xe КСЕНОН 131,30					
Ta 73 ТАНТАЛ 180,9479	W 74 ВОЛЬФРАМ 183,85	Re 75 РЕНИЙ 186,207	Os 76 ОСМИЙ 190,2	Ir 77 ИРИДИЙ 192,22	Pt 78 ПЛАТИНА 195,09			
83 Bi ВИСМУТ 208,9804	84 Po ПОЛОНИЙ [209]	85 At АСТАТ [210]	86 Rn РАДОН [222]					
Ns 105 НИЛЬСБОРИЙ [261]	106	107						
R ₂ O ₅		RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄				
RH ₃		RH ₂	RH					
Eu 63 ЕВРОПИЙ 151,96	Gd 64 ГАДОЛИНИЙ 157,25	Tb 65 ТЕРБИЙ 158,9254	Dy 66 ДИСПРОЗИЙ 162,50	Ho 67 ГОЛЬМИЙ 164,9304	Er 68 ЭРБИЙ 167,26	Tm 69 ТУЛМИЙ 168,9342	Yb 70 ИТТЕРБИЙ 173,04	Lu 71 ЛЮТЕЦИЙ 174,967
Am 95 АМЕРИЦИЙ [243]	Cm 96 КУРИЙ [247]	Bk 97 БЕРКИЙ [247]	Cf 98 КАЛИФОРНИЙ [281]	Es 99 ЭЙНШТЕЙНИЙ [284]	Fm 100 ФЕРМИЙ [287]	Md 101 МЕНДЕЛЕВИЙ [288]	(No) 102 НОВАЕЛИЙ [289]	(Lr) 103 ЛОУРЕНСИЙ [260]

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Механика	
§ 1. Кинематика	4
§ 2. Динамика материальной точки и системы материальных точек	13
§ 3. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса	19
§ 4. Механика твердого тела	25
Условия равновесия твердого тела	26
Динамика вращательного движения твердого тела	—
Равновесие твердого тела	29
§ 5. Механика жидкостей и газов	31
Гидро- и аэростатика	33
Гидро- и аэродинамика	34
§ 6. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции	36
§ 7. Элементы специальной теории относительности	38
§ 8. Упругие свойства тел	41
§ 9. Механические колебания и волны	43
Колебания	45
Волновое движение	48
§ 10. Закон всемирного тяготения	50
Глава II. Молекулярная физика и термодинамика	
§ 11. Основы молекулярно-кинетической теории газов	52
Основное уравнение кинетической теории газов	53
Газовые законы	54
Распределения Максвелла и Больцмана. Барометрическая формула	57
§ 12. Явления переноса в газах	59
Средняя длина свободного пробега молекул. Число столкновений	60
Диффузия, вязкость и теплопроводность газов	62
§ 13. Первое начало термодинамики	63
Теплоемкость	64
Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу	65
Элементы газодинамики	70
§ 14. Второе начало термодинамики	71
Тепловые двигатели и холодильные машины	72
Энтропия	76
§ 15. Реальные газы и жидкости	78
Реальные газы	79
Жидкости	81
§ 16. Тепловые свойства твердых тел. Фазовые переходы	85
Тепловые свойства твердых тел	86
Фазовые переходы	87
Глава III. Электричество и магнетизм	
§ 17. Электростатика	89
Закон Кулона	90
Напряженность и потенциал поля	93
Проводники и диэлектрики в электрическом поле	96
Емкость	98
Энергия электрического поля	101

§ 18. Постоянный электрический ток	104
Закон Ома	105
Правила Кирхгофа	110
Работа и мощность тока	113
§ 19. Термоэлектронная эмиссия и контактные явления	116
Термоэлектронная эмиссия	117
Контактные явления	118
§ 20. Электрический ток в электролитах и газах	119
Электрический ток в электролитах	—
Электрический ток в газах	121
§ 21. Магнитное поле. Действие магнитного поля на движущиеся заряды и токи	122
§ 22. Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля	130
§ 23. Переменный ток. Электромагнитные колебания и волны	134
Глава IV. Оптика	
§ 24. Интерференция света	139
§ 25. Дифракция света	143
§ 26. Геометрическая оптика	147
Отражение света	148
Преломление света	149
Линзы и оптические системы	151
Оптические приборы	154
§ 27. Фотометрия	156
§ 28. Поляризация света	158
§ 29. Дисперсия и поглощение света. Рассеяние света	161
§ 30. Релятивистские эффекты в оптике	163
Глава V. Квантовая физика	
§ 31. Квантовые свойства излучения	165
Энергия, импульс и масса фотона	166
Фотоэффект	167
Давление света	168
Тормозное рентгеновское излучение	169
Эффект Комптона. Интенсивность рентгеновских лучей	170
Тепловое излучение	171
§ 32. Волновые свойства вещества	173
Волны де Бройля	174
Принцип неопределенности Гейзенберга	175
Уравнение Шрёдингера	176
Закон Мозли	177
§ 33. Модель атома Резерфорда — Бора	—
§ 34. Квантовые явления в твердых телах	179
§ 35. Физика атомного ядра	183
Строение ядра	—
Закон радиоактивного распада	184
Ядерные реакции	186
§ 36. Элементарные частицы	188
Ответы и решения	191
Приложение	257

НБ ПНУС



bn13456

Учебное издание

Загуста Геннадий Александрович

Макеева Галина Павловна

Микулич Алексей Степанович

Савицкая Инесса Федоровна

Цедрик Михаил Семенович

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

Зав. редакцией **И. А. Иванов**

Редактор **Т. П. Каткова**

Младшие редакторы **Е. В. Казакова, Л. И. Заседателева, О. В. Агапова**

Художественный редактор **В. М. Прокофьев**

Художники **О. М. Шмелев, В. С. Давыдов, Э. М. Фрам**

Технический редактор **Е. Н. Зелянина**

Корректор **Н. В. Бурдина**

ИБ № 10583

Сдано в набор 02.06.88. Подписано к печати 03.02.89. Формат $60 \times 90^{1/16}$. Бум. офсетная № 2. Гарнит. школьная. Печать офсет. Усл. печ. л. $17 + 0,25$ форз. Усл. кр.-отт. 17,50. Уч.-изд. л. 15,82. + 0,42 форз. Тираж 49000 экз. Заказ 4719. Цена 85 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41. Областная типография, 160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.

ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

экса Э 1 0000000000000000000 = 10^{18}

пета П 1 00000000000000000 = 10^{15}

тера Т 1 0000000000000 = 10^{12}

гига Г 1 000000000 = 10^9

мега М 1 000000 = 10^6

кило к 1 000 = 10^3

гекто г 1 00 = 10^2

дека да 10 = 10^1

деци д 0,1 = 10^{-1}

сантис с 0,01 = 10^{-2}

милли м 0,001 = 10^{-3}

микро мк 0,000001 = 10^{-6}

нано н 0,000000001 = 10^{-9}

пико п 0,0000000000001 = 10^{-12}

фемто ф 0,0000000000000001 = 10^{-15}

атто а 0,0000000000000000001 = 10^{-18}