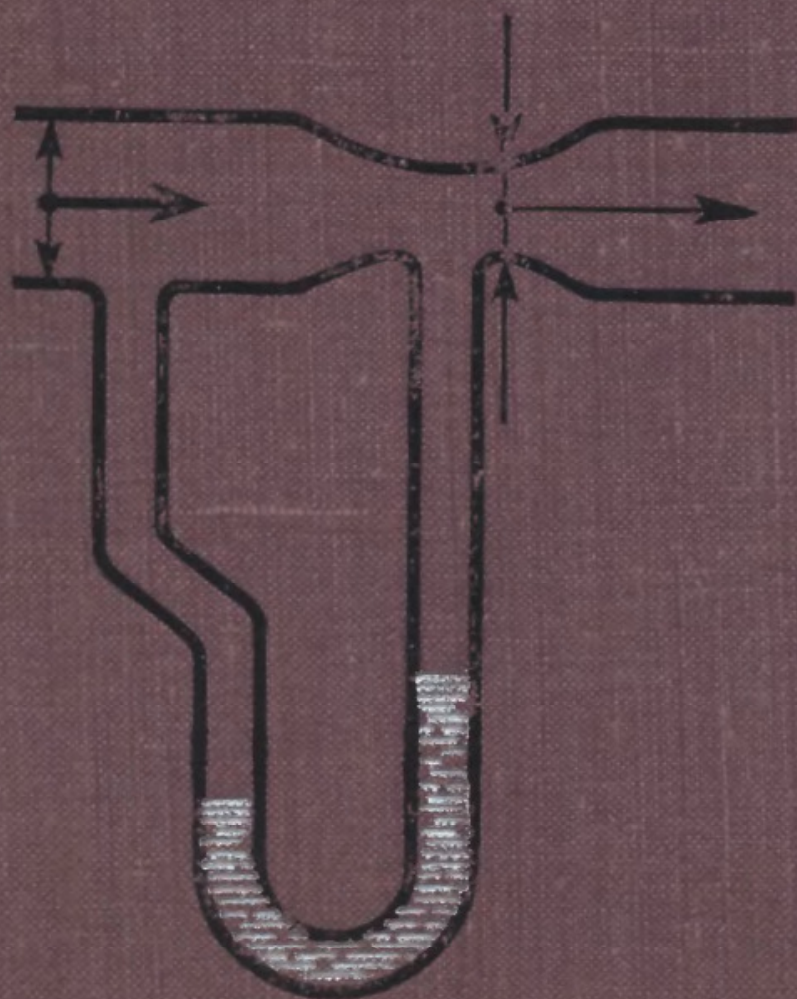


В.А.БАЛАШ

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ



В. А. БАЛАШ

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

*Допущено
Министерством просвещения СССР
в качестве учебного пособия для студентов
физико-математических факультетов
педагогических институтов*

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1978

Рецензенты:

кафедра физики Рязанского педагогического ин-
ститута и Стручков В. В., кандидат физ.-мат.
наук, доцент МГПИ имени В. И. Ленина

Балаш В. А.

Б20 Сборник задач по курсу общей физики. Учеб. по-
собие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов.
М., «Просвещение», 1978.

208 с. с ил.

Это учебное пособие для студентов физических и физико-математиче-
ских факультетов педагогических институтов составлено в соответствии с
программой курса общей физики. Ко всем задачам даны ответы. Большин-
ство задач составлено в международной системе единиц СИ.

Б $\frac{60602-243}{103(03)-78}$ 30—78



53

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый сборник задач составлен в соответствии с программой по курсу общей физики для студентов физических факультетов педагогических институтов. При подборе задач автором учтено значительное повышение уровня преподавания физики в средней школе.

Большинство из включенных задач предлагалось на экзаменах, зачетах или контрольных работах в вузах страны, некоторые являются оригинальными. Элементарные задачи тренировочного характера в пособие не включены, однако идеи наиболее интересных школьных задач повышенной трудности в сборнике отражены. Многие из задач содержат несколько вопросов, тесно связанных друг с другом, что позволяет разнообразить работу студентов.

Для решения задач предлагаемого сборника требуется тщательное и осмысленное изучение теоретического материала и умение пользоваться методами математики в физических исследованиях.

Можно надеяться, что серьезная работа над задачами поможет будущим учителям подготовиться к преподаванию физики.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору В. П. Орехову, доцентам Э. А. Корзуну и В. В. Стручкову за полезные советы и высказанные замечания, способствовавшие улучшению рукописи пособия.

Автор

§ 1. Кинематика материальной точки и твердого тела

1.1. Подводная лодка, погружаясь вертикально вниз, излучает в направлении дна короткие импульсы сигнала гидролокатора длительностью t_0 . Длительность отраженных сигналов, принимаемых на лодку, равна t . С какой скоростью погружается лодка, если скорость звука в воде u и дно горизонтально?

1.2. Два автомобиля выезжают одновременно из одного города в другой. Расстояние между городами l_0 . Первый автомобиль проходит первую половину пути со скоростью v_1 , вторую — со скоростью v_2 . Вторым автомобилем первая половина всего времени движения проходит со скоростью v_1 , вторую — со скоростью v_2 . Какой из автомобилей и насколько раньше прибывает в пункт назначения? Каково расстояние l_1 между автомобилями в тот момент, когда один из них финиширует? Решите задачу аналитически и графически.

1.3. Вертолет при отсутствии ветра последовательно облетает пункты A , B , C и D , расположенные в углах квадрата (по кратчайшему расстоянию) за 4 ч. При ветре, дующем в направлении от A к D , время облета тех же пунктов по тому же маршруту равно 3 ч. За какое время вертолет пролетит по маршруту AC при том же направлении ветра?

1.4. Необходимо попасть из пункта A , находящегося на берегу озера, в пункт B , расположенный на острове и удаленный от берега на расстояние l (рис. 1.1). Расстояние $AB = s$. За какое минимальное время можно добраться из A в B , если передвигаться по земле на автомобиле со скоростью v , а по воде на лодке со скоростью u ?

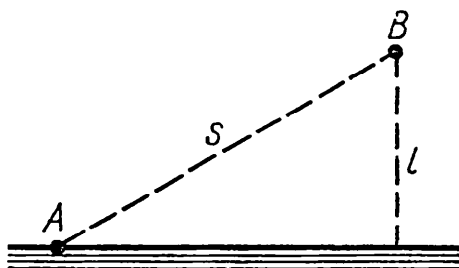


Рис. 1.1.

На каком расстоянии от A нужно пересечь из автомобиля в лодку?

1.5. Три лодки стоят в спокойной воде на одинаковом расстоянии друг от друга в вершинах равностороннего треугольника. Лодки начинают двигаться с постоянной по величине скоростью v так, что в каждый момент времени одна лодка находится на курсе другой. Най-

дите: а) уравнение траектории движения лодок и место их встречи; б) время, через которое встретятся лодки, и расстояние, пройденное каждой из них до встречи.

1.6. Верхняя часть кабины катера имеет форму полусферы радиусом R . Катер движется со скоростью v под вертикальным дождем. Скорость капель u . Во сколько раз число капель, падающих на переднюю часть купола больше, чем на заднюю?

1.7. Корабль плывет на юг со скоростью v . Заметив в море катер, наблюдатель, находящийся на палубе корабля, определил, что катер движется относительно корабля пересекающим курсом на северо-запад со скоростью v_0 под углом φ к линии визирования и расстояние до него равно s_0 . а) С какой скоростью катер плывет относительно берега? б) По какому закону меняется расстояние между судами? в) Через какое время t_1 расстояние между судами станет наименьшим? г) Какое расстояние пройдет катер за время t_1 и пересечет ли он курс корабля? д) Через сколько времени расстояние между кораблями снова станет равным s_0 ?

1.8. Прямолинейное движение точки описывается уравнением $x = -1 + 3t^2 - 2t^3$ (в единицах СИ). а) Запишите уравнение скорости и ускорения точки. б) Сколько времени движется точка до остановки? в) Определите максимальную скорость точки. г) Чему равна средняя скорость точки за время движения до остановки? д) Через сколько времени средняя скорость движения точки достигнет максимального значения и какова ее величина?

1.9. Скорость точки при прямолинейном движении с течением времени изменяется по закону, представленному на рисунке 1.2, а, б и в. Участки кривых на чертеже б являются участками парабол, на чертеже в — дугой окружности. Постройте графики зависимостей: $a = f(t)$; $s = f(t)$; $s = f(v)$.

1.10. На рисунке 1.3 показано изменение с течением времени ускорения точки на прямолинейном отрезке пути. Участки кривых на чертеже являются полуокружностями. Определите максимальную и минимальную скорости точки за время такого

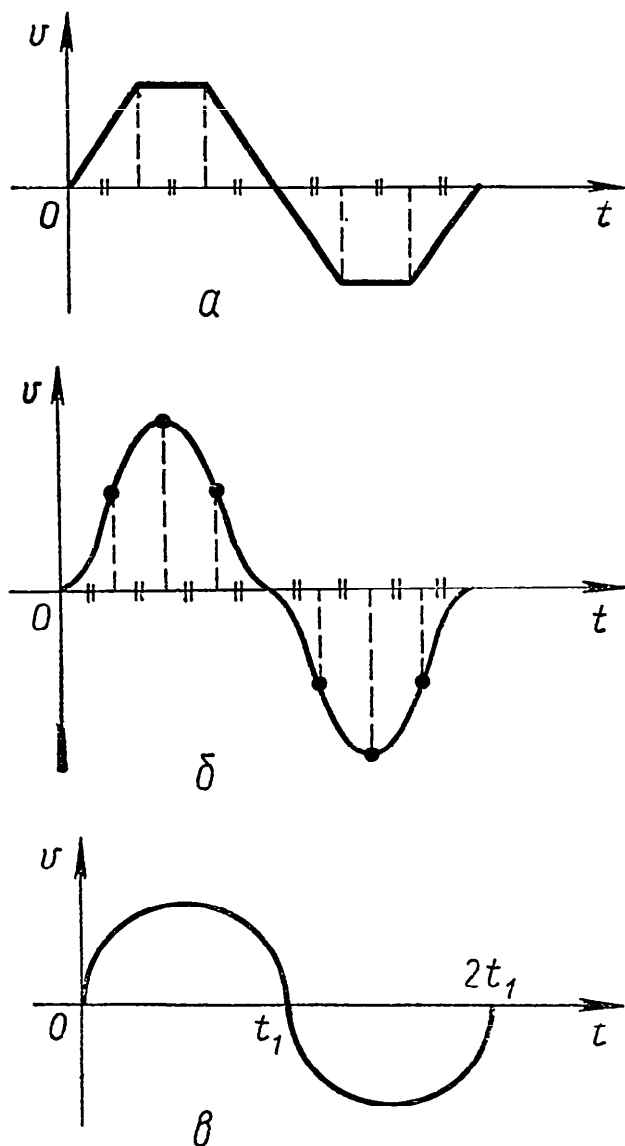


Рис. 1.2.

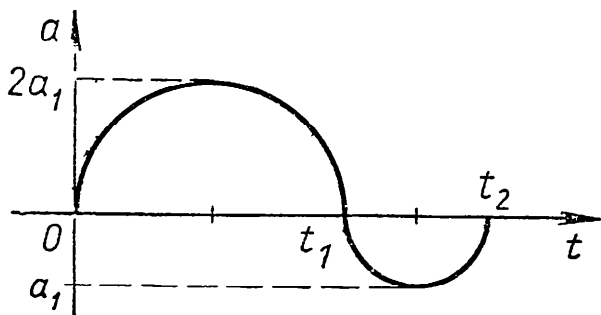


Рис 1.3.

движения. Чему равна средняя скорость точки за время t_2 , если начальная скорость движения была равна нулю?

1.11. Глубину колодца измеряют с точностью до $z = 5\%$, бросая камень и замечая время, через которое будет слышен всплеск. Начиная с каких значений указанного времени следует учитывать время прохождения

звука? Скорость звука в воздухе принять равной $u = 330$ м/с.

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

1.13. Шарик брошен вертикально вверх из точки, находящейся над полом, на высоте H . Определите начальную скорость шарика, время движения и скорость в момент падения, если известно, что за время движения он пролетел путь $3H$.

1.14. Мяч брошен вертикально вверх с начальной скоростью v_0 . Через сколько времени нужно бросить вверх второй мяч, чтобы они встретились в наикратчайшее время, если известно, что начальная скорость второго мяча вдвое меньше, чем у первого? На какой высоте встретятся мячи?

1.15. С идеально упругой плоскости вертикально вверх бросают n шаров со скоростью v и интервалом времени τ . На каком расстоянии по вертикали будет находиться первый шар от $(n-k)$ -го в момент бросания n -го шара? Какова скорость этих шаров относительно друг друга?

1.16. По идеально гладкой плоскости, составляющей угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом, пустили снизу вверх шайбу. На расстоянии большем $l = 1,0$ м от основания плоскости шайба находилась время $\Delta t = 0,5$ с. Найдите начальную скорость шайбы и пройденный ею путь по наклонной плоскости.

1.17. Камень, брошенный горизонтально на высоте $h = 6$ м, упал на землю на расстоянии $s = 10$ м от точки бросания. Найдите: а) начальную скорость камня; б) уравнение траектории и угол падения; в) нормальное и тангенциальное ускорение камня через время $t = 0,2$ с после начала движения; г) радиус кривизны траектории в этот момент.

1.18. Дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту, равна $s = 10$ м, время полета $t = 5$ с. Найдите: а) высоту наибольшего подъема тела и радиусы кривизны траектории в точках бросания и наибольшего подъема; б) наибольшее и наименьшее значения нормального и тангенциального ускорения.

1.19. Тело, брошенное под углом к горизонту, спустя время t имело тангенциальное ускорение a , а через время $4t$ упало на землю. Под каким углом было брошено тело?

1.20. Какую минимальную скорость волейболист должен сообщить мячу, чтобы он перелетел через сетку высотой h , находящуюся на расстоянии l от игрока? Волейболист ударяет по мячу в падении у поверхности земли.

1.21. Под обрывом высотой h установлен миномет (рис. 1.4). Где и под каким углом надо установить миномет, чтобы дальность полета мин по плоскогорью была максимальной? Чему равна эта дальность? Начальная скорость мин v_0 .

1.22. Аэростат поднимается вертикально вверх со скоростью v_0 . В тот момент, когда он находится на высоте h , из него в горизонтальном направлении бросили предмет со скоростью v_0 относительно аэростата. Определите: а) горизонтальную дальность полета тела; б) угол падения тела на землю; в) угол бросания тела относительно пола кабины, при котором горизонтальная дальность полета тела будет наибольшей.

1.23. На идеально гладкую наклонную плоскость, составляющую с горизонтом угол α , свободно падает абсолютно упругий шарик. Скорость шарика в момент удара равна v . Определите расстояние между точками первого и второго удара при условии, что плоскость: а) покоится; б) поднимается вертикально вверх со скоростью v ; в) движется в горизонтальном направлении со скоростью v . Для случая в) проанализируйте результат в функции угла α .

1.24. На берегу установлен блок, через который проходит веревка длиной l_0 , привязанная одним концом к лодке (рис. 1.5). Подтягивая лодку к берегу, человек начал двигаться от блока равномерно со скоростью v_0 . Какова скорость лодки спустя время t после начала движения человека?

1.25. Два одинаковых груза подвешены на нити, перекинутой через неподвижные блоки, как указано на рисунке 1.6. Какую скорость и ускорение будут иметь грузы в зависимости от расстояния x , если середину нити (точку O) опускать вниз с постоянной скорос-

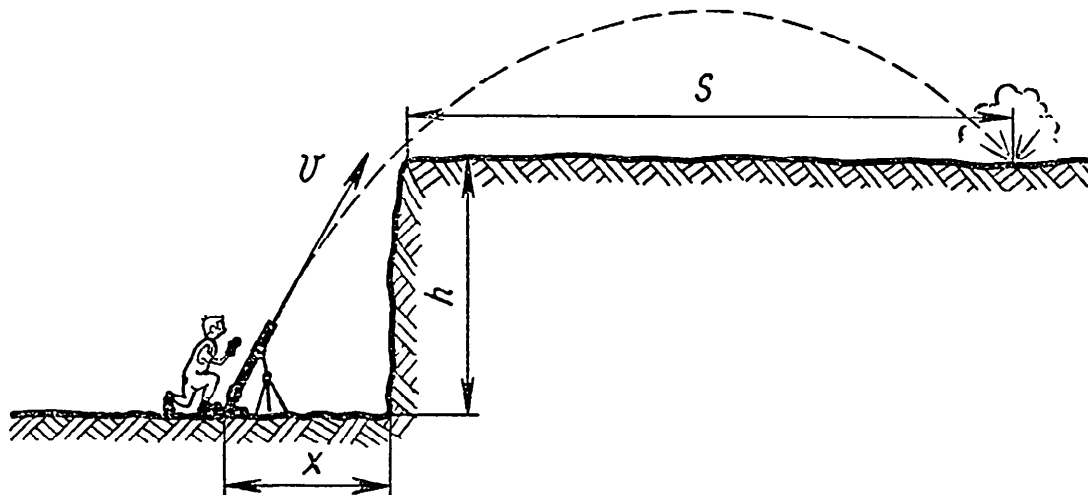


Рис. 1.4.

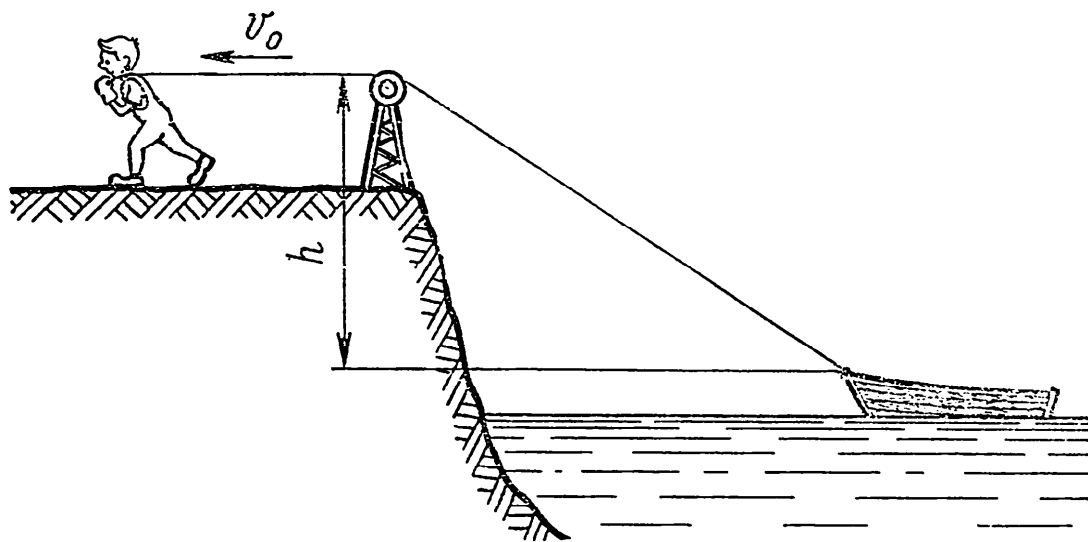


Рис. 1.5.

тью u ? Какова скорость грузов в тот момент, когда они окажутся на одном уровне с точкой O ?

1.26. Наблюдатель, находящийся у переднего вагона в момент начала движения электропоезда, заметил, что первый вагон прошел мимо него за время t . Сколько времени будет двигаться мимо него n -й вагон, если ускорение поезда при разгоне меняется с течением времени по закону $a = kt$?

1.27. Лодка пересекает реку шириной s_0 . Скорость лодки относительно воды перпендикулярна течению и равна v . На какое расстояние течение снесет лодку за время всего движения, если известно, что при ее удалении от берега до середины реки скорость течения возрастает по закону $u = u_0 + ks$? Какова траектория движения лодки?

1.28. Два спутника летают около Земли по орбитам, близким к круговым, с периодами T_1 и T_2 . В течение какого промежутка времени спутники могут поддерживать между собой непрерывную связь, если она осуществляется только в пределах прямой видимости? Радиусы стационарных круговых орбит равны R_1 и R_2 .

1.29. Точка движется по окружности радиусом R так, что ее тангенциальное ускорение все время равно нормальному. а) Найдите закон изменения величины скорости, полагая, что в момент

начала отсчета движения точка имела скорость v_0 . б) Составьте уравнение движения точки по окружности.

1.30. Самолет, летящий горизонтально со скоростью $v_0 = 320$ км/ч, внезапно меняет курс и начинает двигаться вверх по дуге окружности, лежащей в вертикальной плоскости. Скорость самолета при этом меняет-

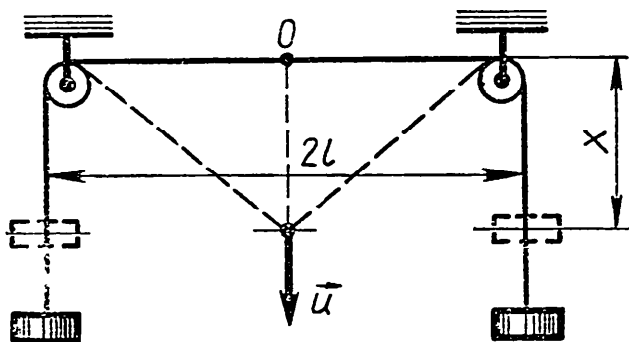


Рис. 1.6.

ся с высотой по закону $v^2 = v_0^2 - 2gy$ и в верхней точке траектории оказывается равной $v_1 = 160$ км/ч. Чему равно ускорение самолета в тот момент, когда его скорость направлена вертикально вверх?

1.31. Автомобиль начал двигаться по выпуклому мосту со скоростью v , изменяющейся в зависимости от пройденного расстояния по закону $v = k\sqrt{s}$. Каково ускорение автомобиля в тот момент, когда он опишет по мосту дугу в α рад?

1.32. Смещение материальной точки по двум взаимно перпендикулярным направлениям описывается уравнениями (x и y в метрах) $x = 0,1 \sin 2t$; $y = 0,05 \sin (2t + \pi/2)$. Найдите: а) уравнение траектории точки; б) зависимость скорости точки от времени; в) зависимость полного ускорения точки от времени; г) радиус кривизны траектории в тех точках, где скорость наибольшая и наименьшая.

1.33. Нить с шариком на конце наматывается на гладкий вертикальный стержень радиусом r , оставаясь все время в горизонтальной плоскости. Начальная скорость шарика и длина нити равны v_0 и l . Каков закон движения шарика в направлении нити? Через сколько времени нить намотается на стержень?

1.34. Барабан начинает вращаться с постоянным угловым ускорением ε вокруг своей оси. По какому закону меняется с течением времени угол φ между векторами скорости и полного ускорения произвольной точки барабана?

1.35. Перед наблюдателем в вертикальной плоскости вращается диск, разделенный на n одинаковых секторов. Около диска закреплен неподвижный указатель. Наблюдая за вращением диска, установили, что дуга первого сектора прошла мимо указателя за $t_1 = 4$ с, дуга соседнего — за $t_2 = 5$ с. После этого диск повернулся на угол $\varphi = 0,75\pi$ и остановился. Считая движение диска равнозамедленным, определите его угловое ускорение.

1.36. В некоторый момент времени вращение одного диска описывается уравнением $\varphi_1 = 2\omega_0 t + 0,1t^2$, второго $\varphi_2 = \omega_0 t - 0,1t^2$. Через время $\tau = 5$ с первый диск опережает второй на пять оборотов. На сколько оборотов первый диск будет опережать второй к тому моменту, когда второй диск остановится?

1.37. Стержень длиной $2l$ вращается в горизонтальной плоскости так, что в некоторый момент времени скорость одного конца стержня равна v_1 и направлена под углом α к стержню, скорость второго конца v_2 . Определите угловую скорость вращения стержня относительно его центра.

1.38. При трогании автомобиля с места по льду ведущие колеса диаметром $d = 0,75$ м вращались с постоянной угловой скоростью $\omega = 4$ 1/с до тех пор, пока автомобиль не получил ускорение $a = 0,9$ м/с². Чему равна скорость и ускорение точки колеса, соприкасающейся с дорогой через $t = 5$ с после начала движения автомобиля?

1.39. Автомобиль движется по прямому шоссе так, что его движение описывается уравнением $x = t^2$ (x в метрах). Радиус колеса автомобиля $R = 1$ м. а) Составьте в параметрической форме уравнение движения какой-либо точки колеса, лежащей на ободу, полагая, что в начальный момент она совпадает с полотном шоссе. б) Найдите скорость и ускорение этой точки в те моменты, когда она первый раз попадает на уровень горизонтального диаметра и в вершину траектории. в) Определите радиусы кривизны траектории точки в эти моменты. г) Найдите геометрическое место точек колеса, скорости которых численно равны скорости автомобиля.

1.40. Зубчатое колесо радиусом $R = 1$ м зажато между двумя рейками, движущимися в одну сторону со скоростями $v_1 = 1 + 3t$ и $v_2 = 1 - t$ (v_1 и v_2 в метрах в секунду). а) Составьте уравнения движения, скорости и ускорения оси колеса. Определите: б) скорости и ускорения точек обода, лежащих на концах горизонтального диаметра, к концу второй секунды движения; в) ускорения точек колеса, соприкасающихся с рейками.

Решите задачу при условии, что рейки движутся в разные стороны.

1.41. Шар радиусом $r = 2,5$ см катится в горизонтальной плоскости без скольжения по кольцевым рельсам. Радиус кривизны наружного рельса $R_1 = 10$ см, внутреннего — $R_2 = 7$ см. Полный оборот вокруг своей оси шар делает за время $t = 5$ с. Определите величину и направление полной угловой скорости шара.

1.42. С автомобиля, идущего со скоростью v_0 , соскочило колесо и покатило по кругу радиуса R . Радиус колеса r . Определите угловую скорость и угловое ускорение колеса.

§ 2. Законы Ньютона

2.1. На две частицы массами m и $2m$, летящими перпендикулярно друг другу с постоянными скоростями v и $2v$ соответственно, в течение некоторого времени действуют две одинаковые силы. К моменту прекращения действия сил первая частица движется в обратном направлении со скоростью $2v$. С какой скоростью и в каком направлении стала двигаться вторая частица?

2.2. В воде плавает палочка длиной l , массой M , на конце которой сидит жук массой m . В некоторый момент времени жук начинает ползти к другому концу палочки, двигаясь относительно нее со скоростью u . Считая силу сопротивления воды постоянной и равной F , найдите: уравнение движения палочки; расстояние, на которое сместится жук, пройдя палочку.

2.3. Аэростат, имеющий вместе с балластом массу m , опускается вниз с постоянным ускорением a . Сколько балласта нужно сбросить с аэростата, чтобы он опускался с прежним ускорением, но направленным вертикально вверх? Трением пренебречь.

2.4. Лифты Останкинской телевизионной башни, работающие до высоты 337 м, имеют скорость равномерного движения 7 м/с

и поднимаются за 60 с. Считая ускорение постоянным по величине и одинаковым во время разгона и торможения, определите силу давления груза массой 100 кг на дно лифта в начале, середине и конце подъема.

2.5. К потолку кабины лифта массой M подвешен идеально упругий шарик массой $m \ll M$. Шарик находится на расстоянии H от пола. Под действием силы F кабина начинает подниматься ускоренно. Чему равно натяжение нити, которой шарик привязан к потолку кабины? Через сколько времени шарик достигнет пола, если нить внезапно оборвется? На какую высоту над полом подскочит шарик после удара?

2.6. Через неподвижный блок переброшен легкий нерастяжимый тросик, к одному концу которого привязано $n = 10$ одинаковых грузиков. За свободный конец тросика тянут с силой $F_0 = 9,8$ Н, и вся система находится в равновесии (рис. 2.1). В некоторый момент сила тяги начинает изменяться по закону $F = 9,8 + 4t - 2t^2$ (F в ньютонах) до значения F_0 . Какую максимальную скорость будут иметь грузы в процессе движения? Какова должна быть минимальная прочность нитей, соединяющих грузы, чтобы не произошло разрыва при движении системы?

2.7. Маляр работает в подвесном кресле (рис. 2.2). Масса маляра 72 кг, масса кресла 12 кг. С какой силой маляр должен подтягивать свободный конец веревки, чтобы подняться на высоту 3 м за 2 с? С какой силой маляр будет давить на кресло во время движения? На блок действует сила трения 30 Н.

2.8. Два блока подвешены на динамометре, как указано на рисунке 2.3. К свободному концу нити, пропущенной через блоки, прикреплен груз массой $m = 60$ кг, на подвижном блоке висит груз массой $M = 90$ кг. В некоторый момент времени грузы находились на одном уровне, затем были предоставлены самим себе. Определите: время, в течение которого расстояние между грузами

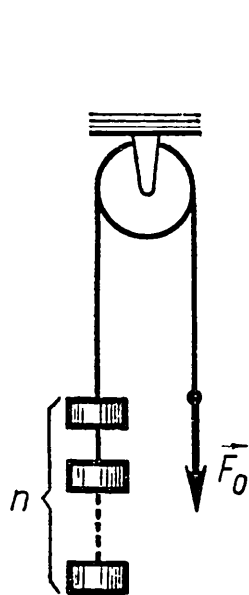


Рис. 2.1.

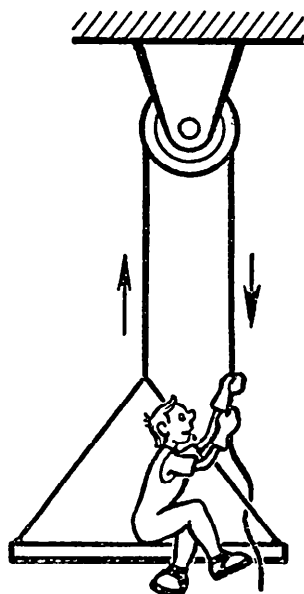


Рис. 2.2.

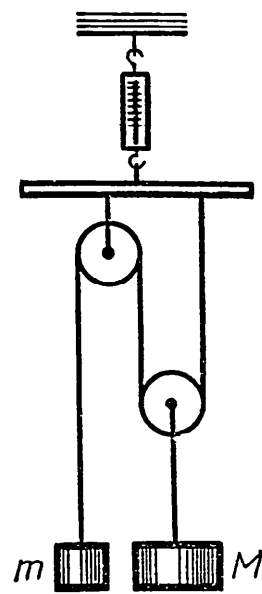


Рис. 2.3.

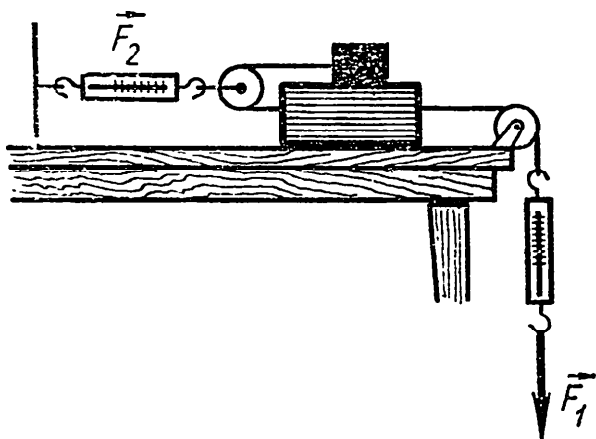


Рис. 2.4.

станет равным 2 м; показание динамометра при движении грузов.

2.9. Санки массой $m = 5$ кг в течение времени $t = 5$ с тянули горизонтально силой $F = 20$ Н. Коэффициент трения между санками и дорогой $f = 0,3$. Какое расстояние пройдут санки от начала движения до полной остановки?

2.10. На рисунке 2.4 массы брусков одинаковы, коэффициен-

ты трения скольжения между брусками и между бруском и столом $f = 0,3$. Если за динамометр, подвешенный к концу нити, свисающей с блока, потянуть с силой F_1 , то бруски начнут двигаться ускоренно и за время $t = 0,5$ с пройдут путь $s = 0,5$ м; показание второго динамометра при этом равно $F_2 = 40$ Н. Определите: а) показания первого динамометра; б) показания динамометров при условии, что к первому динамометру подвесили груз, сила тяжести которого равна F_1 .

2.11. На столе массой M находится система грузов, указанная на рисунке 2.5. Коэффициент трения между грузом массой $2m$ и столом $f = 0,1$. При каком минимальном значении коэффициента трения между полом и столом стол будет находиться в покое при движении грузов?

2.12. На гладком горизонтальном столе лежат два одинаковых кубика массой m , соединенные пружиной жесткости k . Длина пружины в нерастянутом состоянии l_0 . К правому кубику привязана нить с грузом массой m на конце (рис. 2.6). В некоторый момент времени этот груз отпускают и система начинает двигаться

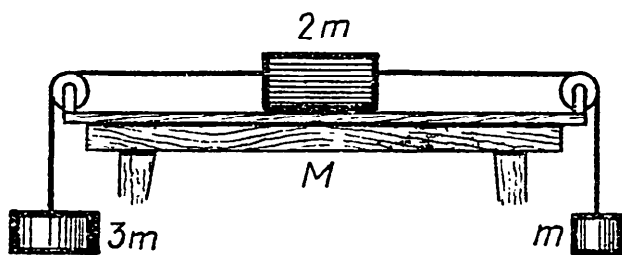


Рис. 2.5.

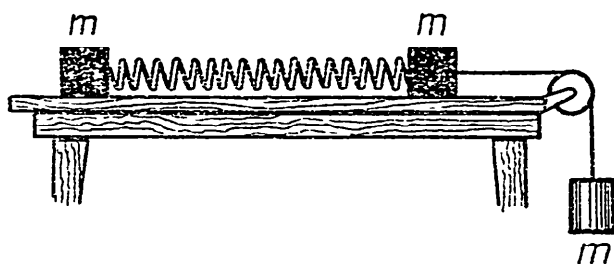


Рис. 2.6.

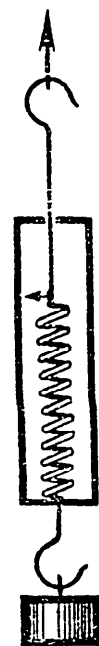


Рис. 2.7.

без начальной скорости. Найдите минимальное и максимальное расстояния между кубиками при движении системы.

2.13. Груз массой $3m$ поднимают равноускоренно вверх на динамометре (рис. 2.7), массы пружины и корпуса которого одинаковы и равны m . Во сколько раз показание динамометра отличается от максимальной силы натяжения пружины?

2.14. Один конец однородного каната удерживают над поверхностью земли, второй — касается земли. Масса каната равна m , длина его l . По какому закону будет меняться с течением времени сила давления каната на землю, если его отпустить?

2.15. На легкой нити, перекинутой через блок, подвешены два груза с массами m и M . Предоставленные самим себе грузы приходят в ускоренное движение. Зная, что на нить действует сила трения f , определите ускорение и изменение импульса центра масс системы, спустя время t после начала движения.

2.16. Два бруска с массами M и m находятся на идеально гладкой наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол α . К одному из брусков вдоль наклонной плоскости приложена сила $F > (M + m)g\sin\alpha$. Определите, с какой максимальной силой бруски давят друг на друга при движении. Рассмотрите случаи, когда сила F направлена вверх по наклонной плоскости и когда вниз.

2.17. Груз массой m лежит на идеально гладкой поверхности клина с острым углом α и удерживается посредством легкой нити, закрепленной у его верхнего ребра (рис. 2.8). Каково натяжение нити и давление груза на грань, если клин станет двигаться вправо (влево) с ускорением \vec{a} ? При каком значении a груз перестанет давить на клин? исчезнет натяжение нити?

2.18. Два груза массами M и m находятся на минимальном расстоянии друг от друга на гранях гладкого прямоугольного клина с острым углом α (рис. 2.9). Предоставленные самим себе грузы приходят в ускоренное движение. Какова скорость грузов в тот момент, когда расстояние между ними станет наибольшим? Длина нити l . Какое давление оказывает блок на ось при движении грузов? Массой блока пренебречь.

2.19. На наклонной грани прямоугольного клина с острым углом α , лежащего на горизонтальном столе, находится небольшая идеально гладкая шайба массой m . Масса клина $2m$. а) При

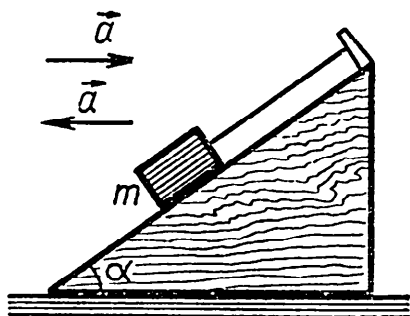


Рис. 2.8.

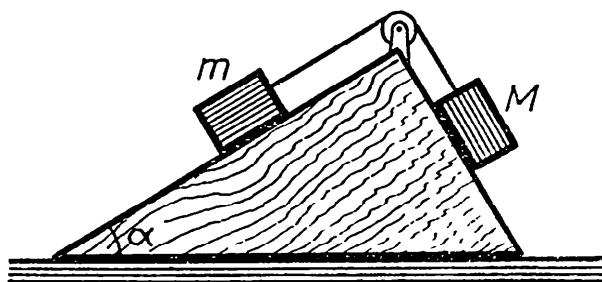


Рис. 2.9.

каком минимальном значении коэффициента трения f между клином и столом клин будет находиться в покое во время скольжения шайбы? б) Каковы ускорения шайбы и клина при $f = 0$?

2.20. Тело пущено вверх по наклонной плоскости. Коэффициент трения между телом и плоскостью $f = 0,5$, начальная скорость тела $v_0 = 19,6$ м/с. Определите угол α , при котором время подъема минимально, и это время.

2.21. Ящик массой $m = 10$ кг перемещают по полу, прикладывая к нему некоторую силу F под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. В течение времени $t = 5$ с скорость ящика возросла с $v_1 = 2$ м/с до $v_2 = 4$ м/с. Коэффициент трения скольжения между ящиком и полом $f = 0,15$. а) Определите величину силы F . б) Под каким углом α_0 к горизонту должна быть приложена сила F , чтобы она была минимальной, и какова величина этой силы?

2.22. Брусok массой M опускается ускоренно по наклонной плоскости и поднимает гирю массой m (рис. 2.10). Коэффициент трения между бруском и плоскостью равен f . Пренебрегая массой нитей и блоков, определите ускорение бруска и давление на оси блоков.

2.23. Две одинаковые равнобедренные прямоугольные призмы массами m стоят на гладком горизонтальном столе (рис. 2.11). Сверху на призмы осторожно положили цилиндр массой m , и вся система пришла в движение. Радиус цилиндра R , коэффициент трения между цилиндром и гранями призм f . Какова скорость цилиндра в тот момент, когда он коснется стола?

2.24. На тело массой $m = 1$ кг, лежащее на шероховатой горизонтальной поверхности, в некоторый момент времени под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту начала действовать сила, пропорциональная времени: $F = 1,12 t$ (F в ньютонах). Определите скорость движения тела спустя время $t_1 = 3$ с, а также ускорение тела по истечении $t_2 = 20$ с. Коэффициент трения между телом и поверхностью $f = 0,2$.

2.25. Снаряд массой m вылетает из ствола со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Полагая, что сила сопротивления воздуха меняется по закону $\vec{F} = -k\vec{v}$, определите максимальную высоту

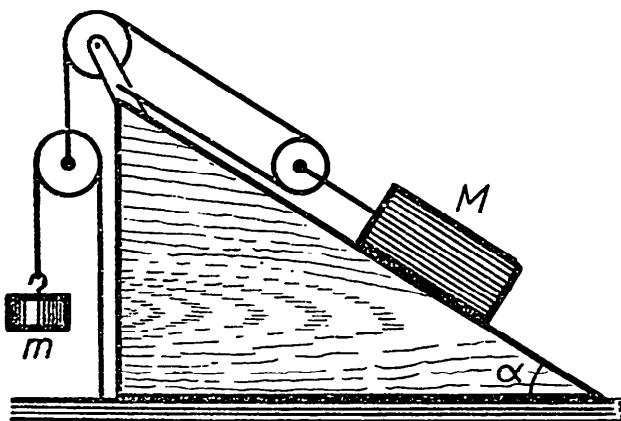


Рис. 2.10.

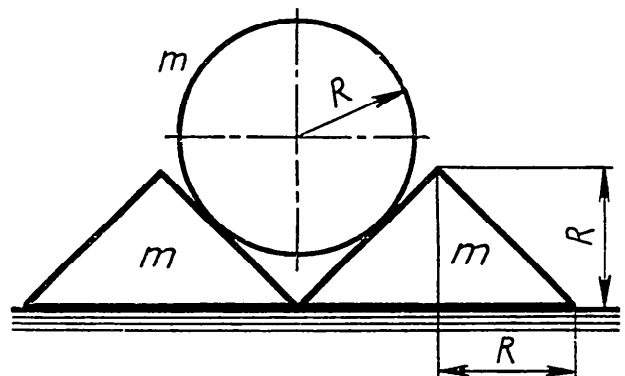


Рис. 2.11

подъема и дальность полета снаряда. Коэффициент пропорциональности таков, что при скорости $v = v_0$ $F = mg$.

2.26. Моторная лодка массой $m = 200$ кг двигалась по озеру со скоростью $v_0 = 20$ м/с. Считая силу сопротивления воды пропорциональной квадрату скорости, определите зависимость скорости лодки и пройденного ею пути от времени после выключения мотора.

2.27. Какую постоянную горизонтальную силу нужно приложить к тележке массой $3m$ (рис. 2.12), чтобы бруски массами m и $2m$ относительно нее не двигались? Трением пренебречь. Каковы ускорения брусков при $F_1 = 6mg$ и $F_2 = 24mg$?

2.28. Пренебрегая трением, определите ускорение грузов в системе, представленной на рисунке 2.13. Массы грузов и блоков соответственно $2m$ и m .

2.29. Тело массой $m = 1$ кг находится на наклонной грани клина, составляющей с горизонтом угол $\alpha = 45^\circ$. Коэффициент трения между телом и клином $f = 0,5$. а) С каким ускорением a_1 нужно двигать клин в горизонтальном направлении, чтобы тело не скользило по клину? С какой силой тело будет при этом давить на клин? б) За какое время тело спустится с вершины клина, если он будет двигаться с ускорением $a_2 = 0,5a_1$? Длина наклонной плоскости $l = 1,225$ м. в) За какое время тело поднимется от основания наклонной плоскости до вершины, если клин будет двигаться с ускорением $a_3 = 2a_1$?

2.30. К концам легкой нити, перекинутой через блок, укрепленный на динамометре, подвешены два груза с массами m и M . Определите ускорение грузов относительно друг друга и показание динамометра при условии, что точка подвеса динамометра движется с ускорением a , направленным под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту.

2.31. Три идеально гладкие пластинки массами $3m$, $2m$ и m соединены посредством легких нитей и блоков, как указано на рисунке 2.14. а) Чему равно натяжение нитей при движении системы? б) При каком минимальном коэффициенте трения f между пластинками, находящимися на наклонной плоскости, система будет двигаться как одно целое?

2.32. Каково ускорение клина с углом $\alpha = 30^\circ$ и давление на ось блока в системе, указанной на рисунке 2.15? Трением пренебречь.

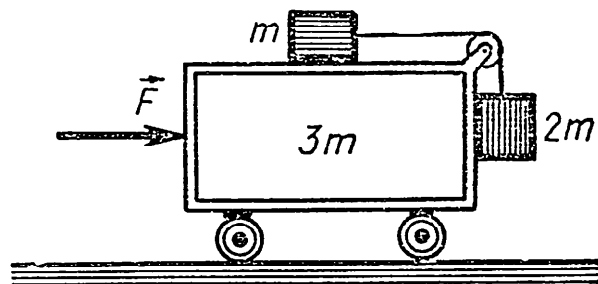


Рис. 2.12.

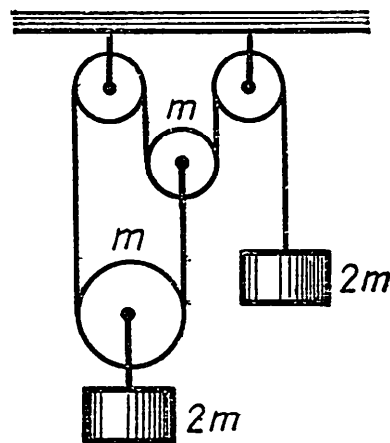


Рис. 2.13.

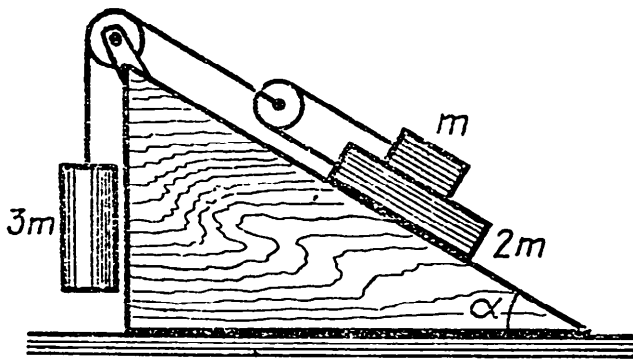


Рис. 2.14.

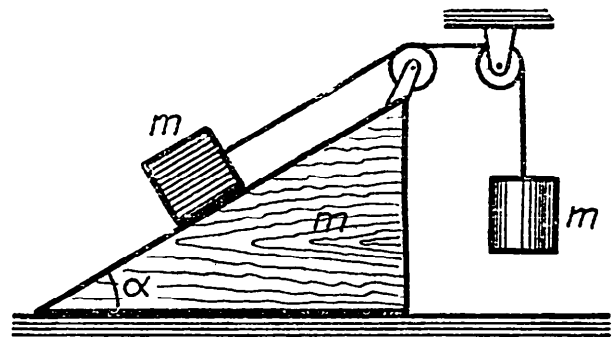


Рис. 2.15.

2.33. Какова скорость бруска у основания клина высотой h и углом $\alpha = 60^\circ$ в системе, указанной на рисунке 2.16? Трением между клином и плоскостью, бруском и клином пренебречь.

2.34. Шайба массой m посредством двух пружин длиной $\frac{2}{3}l$ и $\frac{1}{3}l$ надета на гладкий горизонтальный стержень, как указано на рисунке 2.17. Пружины сделаны из одной и той же проволоки и при равновесии стержня находятся в свободном состоянии. Коэффициент упругости меньшей пружины равен k . Определите положение шайбы на стержне при его вращении с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси, проходящей через конец стержня.

2.35. Автомобиль массой 1500 кг двигался по выпуклому мосту, имеющему форму дуги окружности с центральным углом 60° . При въезде на мост скорость автомобиля была вдвое больше, чем при съезде с моста. Тангенциальное ускорение автомобиля $3,7 \text{ м/с}^2$. Определите максимальную силу давления автомобиля на мост.

2.36. Автомобиль, трогаясь с места, равномерно набирает скорость, двигаясь по горизонтальному участку дороги, представляющему собой дугу окружности с центральным углом $\alpha = 30^\circ$. Радиус окружности $R = 100 \text{ м}$. С какой максимальной скоростью автомобиль может выехать на прямой участок пути? Коэффициент трения колес о землю $f = 0,3$.

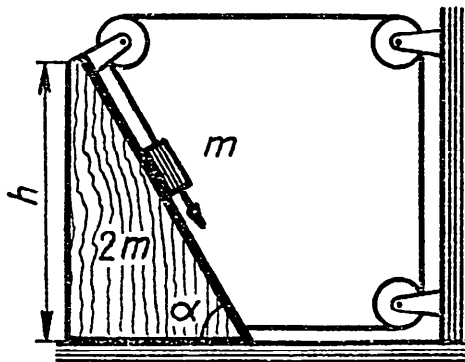


Рис. 2.16.

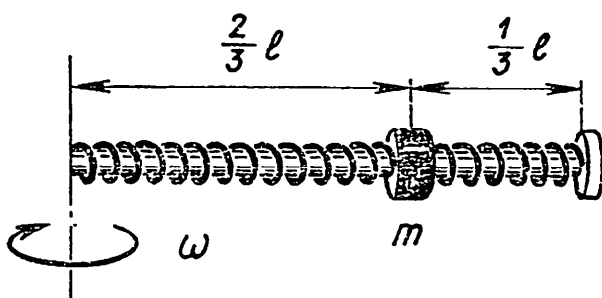


Рис. 2.17.

2.37. Подъемный кран поднял груз так, что длина свисающего троса $l = 3 \text{ м}$. С какой угловой скоростью может разворачиваться кран вокруг вертикальной оси, чтобы отклонение груза от вертикального положения троса не превышало $s = 1 \text{ м}$? Расстояние точки подвеса троса до оси вращения $r = 4 \text{ м}$.

2.38. Стальной шарик радиусом $r = 2$ см катится по двум кольцевым рельсам, расположенным в горизонтальной плоскости. Радиус внешнего рельса $R = 1,73$ м, расстояние между рельсами $l = 2$ см. Какое максимальное число оборотов может делать шарик около своей оси при качении без скольжения по рельсам?

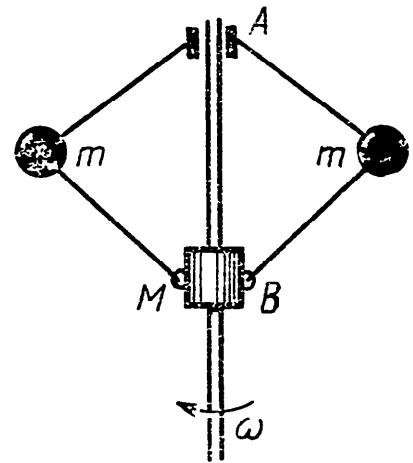


Рис. 2.18.

2.39. Центробежный регулятор, показанный на рисунке 2.18, должен выключать машину, когда скорость вращения вала достигнет $n = 2$ об/с. Управляющая обойма имеет массу $M = 4$ кг и может скользить по вертикальному стержню без трения. Звенья регулятора одинаковы. Выключение происходит в тот момент, когда расстояние AB сокращается до $l = 0,43$ м. Пренебрегая трением в шарнирах и массой звеньев, определите массу грузиков m , необходимую для работы регулятора.

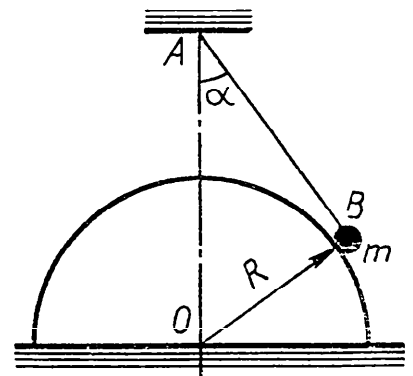


Рис. 2.19.

2.40. Мотоциклист движется с постоянной по величине скоростью v по внутренней (внешней) поверхности полусферы радиусом R , обращенной выпуклостью вниз (вверх). При этом он описывает в горизонтальной плоскости окружность радиусом $R/2$. При каком минимальном коэффициенте трения скольжения между покрышками и поверхностью полусферы возможно такое движение? Под каким углом к вертикали должен наклониться мотоциклист?

2.41. Максимальная скорость, с которой велосипедист может пройти поворот радиусом R на горизонтальном треке, равна v . С какими скоростями велосипедист может проходить такой поворот на треке с углом наклона α ?

2.42. Шарик массой m , подвешенный на легкой нити, образующей угол α с вертикалью, лежит на гладкой полусфере радиусом R (рис. 2.19). Треугольник ABO прямоугольный. Шарик сообщили скорость v перпендикулярно плоскости чертежа, и он стал скользить по полусфере, описывая окружность. Чему равна сила давления шарика на полусферу во время движения? При каком значении v она станет равной нулю?

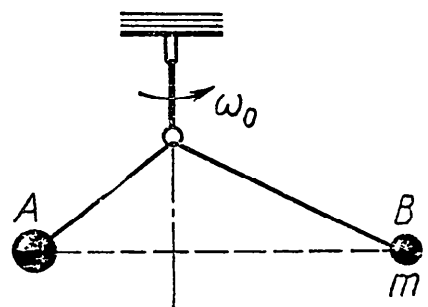


Рис. 2.20.

2.43. Два небольших грузика A и B разной массы соединены нитью длиной l , пропущенной через гладкое кольцо (рис. 2.20). При вращении кольца вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω_0 грузики

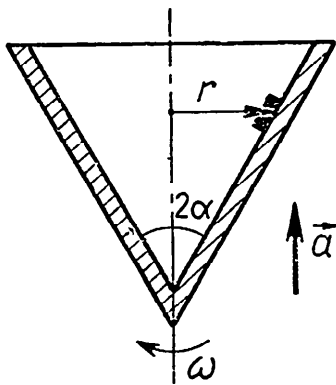


Рис. 2.21.

находятся на одном уровне. Масса грузика B равна m . При каком значении угловой скорости ω нить будет изогнута под углом 90° ?

2.44. Шар радиусом R вращается с угловой скоростью ω вокруг вертикального диаметра. На расстоянии R от вершины шара, на грани скольжения находится небольшая шайба. Чему равен коэффициент трения между шайбой и шаром?

2.45. Внутри конуса, установленного в ракете, поднимающейся вертикально вверх с ускорением a , находится небольшое тело.

Конус имеет при вершине угол 2α и вращается равномерно вокруг своей оси (рис. 2.21). Коэффициент трения между телом и поверхностью конуса $f < \operatorname{tg}\alpha$, ось конуса совпадает с продольной осью ракеты. При каких значениях угловой скорости ω тело будет находиться на расстоянии r от оси конуса?

2.46. На невесомом стержне длиной $2l$ укреплены два шарика массой m каждый. Один шарик находится в середине стержня, другой — на конце. Стержень представляет собой конический маятник и вращается вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω . а) Определите угол α между стержнем и осью вращения. б) Решите задачу при условии, что на стержень надето n шариков и расстояние между ними l .

2.47. Из орудия, установленного на широте $\varphi = 30^\circ$, произведен выстрел на восток. Начальная скорость снаряда $v_0 = 500$ м/с направлена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. На какое расстояние: а) смещается точка падения снаряда в плоскости стрельбы относительно точки падения, рассчитанной без учета вращения Земли; б) отклоняется снаряд от плоскости стрельбы за время полета? Сопротивление воздуха не учитывать.

§ 3. Закон сохранения импульса

3.1. Идеально гладкий шар массой $m = 2$ кг, летящий со скоростью $\vec{v}_1 = 3\vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}$, испытывает неупругое столкновение с шаром массой $M = 3$ кг, имеющим в момент соударения скорость $\vec{v}_2 = -2\vec{i} + 2\vec{j} + 4\vec{k}$ (v_1 и v_2 — в метрах в секунду). Определите скорость шаров после удара.

3.2. Гладкая вертикальная стенка движется в горизонтальном направлении со скоростью u . В стенку попадает шарик массой m , летящий в горизонтальной плоскости со скоростью v , направленной под углом α к стенке. Считая удар абсолютно упругим, определите, под каким углом шарик отразится от стенки и импульс, полученный стенкой.

3.3. Два груза массами M соединены между собой легкой нитью, переброшенной через блок (рис. 3.1). На правый груз осторожно кладут перегрузок массой $m \ll M$, после чего вся система прихо-

дит в ускоренное движение. На высоте $h = H/2$ перегрузок быстро отделяют от груза. Через сколько времени этот груз коснется пола?

3.4. Тепловоз массой $m = 100$ т движется вместе с составом массой $M = 1000$ т со скоростью $v = 36$ км/ч по горизонтальному пути. При разрыве сцепки между тепловозом и составом вагоны прокатились расстояние $s = 100$ м за $t = 10$ с и остановились. Полагая, что сила тяги и силы сопротивления остаются неизменными, определите, на каком расстоянии от состава будет находиться тепловоз в момент остановки вагонов.

3.5. Доска массой M движется равномерно по гладкой горизонтальной поверхности со скоростью v . Сверху на доску осторожно кладут кубик массой $m = M/2$. Какое расстояние пройдет кубик по доске за время проскальзывания? Коэффициент трения между доской и кубиком равен f . Чему равно это расстояние, если в момент соприкосновения с доской кубик имеет скорость $2v$, направленную в сторону движения доски; в противоположную сторону?

3.6. Две лодки массами M_1 и M_2 двигались навстречу друг другу со скоростями v_1 и v_2 . Когда лодки поравнялись друг с другом, пассажиры лодок поменялись грузами массами m_1 и m_2 , сообщив им скорости соответственно u_1 и u_2 перпендикулярно движению лодок. Каковы скорости лодок после обмена грузами?

3.7. Гладкий неупругий шарик налетает на такой же шарик, первоначально покоящийся. После столкновения второй шарик летит под углом α к начальному направлению движения первого шарика. Определите угол, под которым разлетаются шарики после столкновения.

3.8. Клин массой m скользит с вершины наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$. Длина наклонной плоскости l . В тот момент, когда клин прошел половину пути, в него попал груз массой m , падавший свободно с высоты $h = l/2$. Считая удар неупругим и время соударения ничтожно малым, определите скорость клина у основания наклонной плоскости. Коэффициент трения между клином и плоскостью $f = (2\sqrt{3})^{-1}$.

3.9. Снаряд, выпущенный под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, разрывается в верхней точке траектории на высоте $h = 40$ м на три одинаковые части, импульсы которых оказались расположенными в одной плоскости. Одна часть снаряда падает на землю через $t_1 = 1$ с после взрыва под точкой взрыва, вторая — там же через $t_2 = 4$ с. На каком расстоянии от места выстрела и с какой скоростью упадет третий осколок?

3.10. Плот массой M с человеком, масса которого m , плывет в спокойной воде со скоростью v . Человек от середины плота проходит расстояние l за время t и останавливается. Какое расстояние

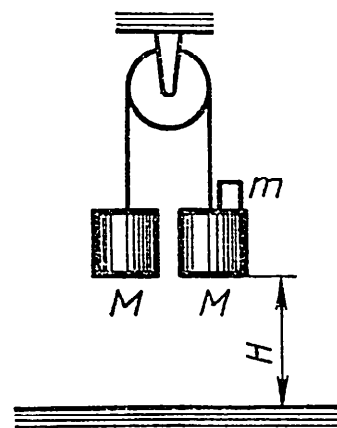


Рис 3.1.

пройдет за это время плот, если: а) человек шел в направлении движения плота; б) в противоположную сторону; в) перпендикулярно движению плота? г) В каком направлении и с какой скоростью должен идти человек, чтобы плот не двигался?

3.11. Катер массой M идет со скоростью v и стреляет по курсу снарядом массой m . Ствол орудия образует с горизонтом угол α . Определите скорость катера после выстрела и расстояние от катера до места падения снаряда, если его начальная скорость относительно воды равна u (начальная скорость снаряда относительно катера равна u). Сопротивлением воздуха пренебречь.

3.12. С какой минимальной скоростью и под каким углом к горизонту должен прыгнуть человек массой m , стоящий на краю неподвижной тележки массой M и длиной l , чтобы попасть на ее конец? Трением между дорогой и тележкой пренебречь.

3.13. На концах легкого однородного стержня находятся два шарика массами m и $2m$. Стержень бросают так, что в начальный момент времени больший шар имеет скорость $v_2 = 10$ м/с, направленную под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, а меньший — скорость $v_1 = 5$ м/с, направленную вертикально вниз. На какую высоту поднимется центр масс системы и какова в этом месте будет его скорость?

§ 4. Динамика тел переменной массы

4.1. Космический корабль массой M_0 выбрасывает топливо с относительной скоростью u . Масса корабля изменяется вследствие сгорания топлива с постоянной скоростью μ . На сколько возрастает скорость корабля за время t ?

4.2. Сколько топлива потребуется для вывода космической ракеты массой $M = 5,00$ т на круговую орбиту вблизи поверхности Земли, если известно, что скорость истечения газов из сопла постоянна и равна $u = 4000$ м/с? Первая космическая скорость $v = 7,9$ км/с. Всеми силами сопротивления движению пренебречь.

4.3. Двухступенчатая исследовательская ракета запущена вертикально вверх. Стартовая масса ракеты $M = 5,9$ т, масса аппаратуры $m = 60$ кг, скорость истечения газов $u = 2500$ м/с. Принимая отношение полезного груза данной ступени к массе ракеты без топлива этой ступени равным $\varepsilon = 0,5$, определите скорость второй ступени после сгорания топлива. Сопротивлением воздуха и действием силы тяжести пренебречь.

4.4. Ракета начинает подниматься вертикально вверх с ускорением $a = 3g$. Относительная скорость истечения газов $u = 2000$ м/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите, через сколько времени масса ракеты уменьшится в два раза.

4.5. Межпланетный космический корабль стартует вертикально вверх с поверхности Земли. Масса корабля без топлива $m_k = 10$ т, скорость истечения газов $u = 10^5$ м/с, ускорение корабля во время подъема постоянно и равно $a = 11,2$ м/с². Учитывая изменение

ускорения свободного падения с высотой, определите необходимый запас топлива, чтобы можно было сообщить кораблю вторую космическую скорость.

4.6. Космический корабль движется с постоянной скоростью. Чтобы изменить направление полета корабля на 90° , был включен двигатель, выбрасывающий струю газа с относительной скоростью u в направлении, перпендикулярном к его траектории. Сколько топлива было израсходовано за время поворота, если начальная масса корабля в момент включения двигателя равнялась m_0 ?

4.7. Ракета запущена вертикально вверх в однородном поле тяжести без начальной скорости. Масса ракеты изменяется с течением времени по закону $m = m_0 \exp(-\alpha t)$, где α — некоторый постоянный коэффициент. Скорость истечения газов u ($\alpha u > g$), масса горючего m_1 . Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите максимальную высоту подъема H ракеты. При каком значении коэффициента α длина активного участка траектории будет наибольшей? Чему равна эта длина?

4.8. Ракета стартует вертикально вверх без начальной скорости в поле земного тяготения. Сечение сопла ракетного двигателя S , газы вылетают из сопла с постоянной скоростью u , имея плотность ρ . Начальная масса ракеты, включая запас горючего, равна m_0 . Пренебрегая сопротивлением воздуха и изменением ускорения свободного падения с высотой, определите максимальную скорость, приобретаемую ракетой.

4.9. По какому закону должна меняться масса космического корабля с течением времени, чтобы во время подъема космонавты не испытывали перегрузок? Стартовая скорость корабля v , скорость истечения газов u . При решении задачи учесть изменение силы тяжести с высотой, а сопротивлением воздуха пренебречь.

4.10. Водометный катер движется с постоянной скоростью, засасывая воду и выбрасывая назад струю со скоростью $u = 20$ м/с относительно катера. Площадь поперечного сечения струи $S = 0,01$ м². Сила сопротивления воды пропорциональна квадрату скорости катера и равна $F = 7,5 v^2$ (F в ньютонах). Чему равна скорость катера?

4.11. Лыжина начала спускаться с горы, образующей с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$. Коэффициент трения между лыжиной и горой $f = 0,5$. В результате нагревания масса лыжины уменьшается с течением времени по закону $m = m_0(1 - 0,5t)$. Пренебрегая абсолютной скоростью отделяющихся частиц, определите скорость лыжины через время $t_1 = 1$ с.

4.12. Вагонетку длиной l и массой m загружают на ходу песком, который сыпется из бункера с высоты h . Вследствие увеличения массы вагонетки ее скорость за время погрузки равномерно уменьшилась от v до $v/3$. Сила сопротивления движению в каждый момент времени пропорциональна силе нормального давления, причем коэффициент пропорциональности равен f . Чему равна скорость μ погрузки песка?

§ 5. Работа, мощность, энергия

5.1. Бревно массой m поднимают по наклонному желобу, имеющему в сечении вид двугранного угла с раствором 2α (рис. 5.1). Желоб наклонен к горизонту под углом β , коэффициент трения между бревном и желобом равен f . Какую работу нужно совершить, чтобы бревно передвинуть вверх по желобу на расстояние l ? При каком значении угла β работа будет максимальной? Чему она равна?

5.2. Шесть пружин с коэффициентом упругости $k = 10^2$ Н/м соединены между собой посредством гладких колец таким образом, что образуют тетраэдр (рис. 5.2). К кольцам приложены четыре одинаковые силы $F = 200$ Н, причем вся система находится в равновесии. Какую работу пришлось совершить, растягивая пружины?

5.3. В ванну, имеющую форму параллелепипеда, налита вода до высоты h . Длина ванны $2b$, ширина a . Посередине ванны имеется легкая пластинка, плотно прилегающая ко дну и стенкам и делящая ее на две равные части. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы сдвинуть пластинку на расстояние a ($a < b$)?

5.4. Автомобиль массой $m = 3000$ кг идет по горизонтальному участку пути со скоростью $v = 36$ км/ч. На сколько увеличивается

мощность автомобиля при движении в гору с той же скоростью, если наклон горы равен $\alpha = 10^\circ$? Силу трения, препятствующую движению, в обоих случаях считать постоянной.

5.5. Через блок перекинута веревка, на одном конце которой закреплен груз массой m , лежащий на полу. В некоторый момент времени на свисающую свободную часть веревки прыгает обезьяна массой M и начинает карабкаться вверх с ускорением a относительно веревки. Какую минимальную мощность должна развивать обезьяна, чтобы добраться до блока, если вначале она и груз находились от блока на расстоянии H ?

5.6. Велосипедист массой m поднимается по наклонному участку пути с постоянной скоростью. Сила сопротивления пропорциональна силе нормального давления, причем коэффициент пропорциональности ра-

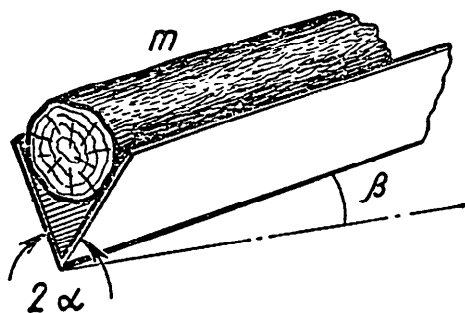


Рис. 5.1.

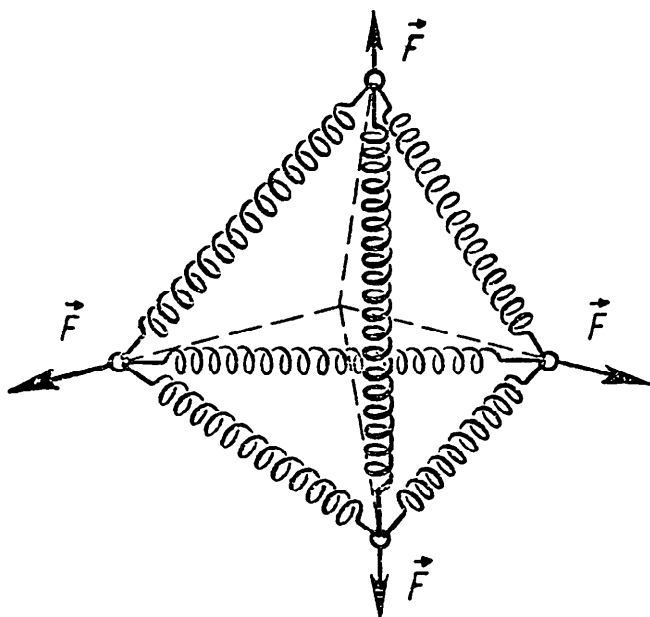


Рис. 5.2.

вен f . По какому максимальному уклону может подниматься велосипедист, развивая всякий раз одинаковую полезную мощность N ? С какой скоростью он будет при этом двигаться?

5.7. Автомобиль массой $m = 10^3$ кг трогается с места. Мощность мотора $N = 50$ кВт, сила сопротивления пропорциональна силе нормального давления, коэффициент пропорциональности $f = 0,1$. За какое минимальное время автомобиль может набрать скорость $v = 72$ км/ч?

5.8. Дальность полета тела массой $m = 0,20$ кг, брошенного под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, $s = 10$ м. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите работу при бросании; кинетическую и потенциальную энергии тела в высшей точке траектории.

5.9. На материальную точку массой $m = 1,00$ кг действовала сила, изменяющаяся по закону $\vec{F} = t\vec{i} + (t + t^2)\vec{j} - (\exp 3t)\vec{k}$ (F в ньютонах). В начальный момент времени точка имела скорость $\vec{v} = 2\vec{j} + \vec{k}$ (v в метрах в секунду). Определите импульс и кинетическую энергию точки спустя время $t = 1$ с после начала действия силы.

5.10. Около поверхности стальной плиты, наклоненной под углом $\alpha = 60^\circ$, находится небольшой тяжелый шарик, подвешенный на легком стержне длиной l (рис. 5.3). Стержень отводят в горизонтальное положение и отпускают. На какой угол φ отклонится шарик после абсолютно упругого удара его о плиту? При каком значении угла α угол отклонения будет наибольшим?

5.11. Два неподвижных блока установлены на одной высоте, на расстоянии $2l$ друг от друга. Через блоки пропущена нить длиной $4l$, на концах которой на одном уровне находятся два груза массой m каждый. К середине нити прикрепили груз массой $2m$ и систему предоставили самой себе. Каковы будут скорости грузов, когда они окажутся на одном уровне? Трением и массой нити пренебречь. Какова будет установившаяся скорость грузов, если нить достаточно длинная?

5.12. Санки скатываются с горки и, пройдя в горизонтальном направлении расстояние l , останавливаются. Масса санок m , коэффициент трения f . а) Какую работу нужно совершить, чтобы санки затащить на горку на прежнюю высоту, прикладывая к ним силу в направлении движения? б) Выясните, будет ли эта работа минимальной, если высота горки равна h .

5.13. С какой максимальной высоты можно пустить по наклонной доске куб с ребром l , чтобы при ударе о выступ он не перевернулся? Угол наклона доски к горизонту $\alpha = 45^\circ$, коэффициент трения между кубом и доской равен f .

5.14. Шайбе, находящейся на плоскости, образующей с горизонтом угол α , сообщили начальную скорость v_0 , направленную

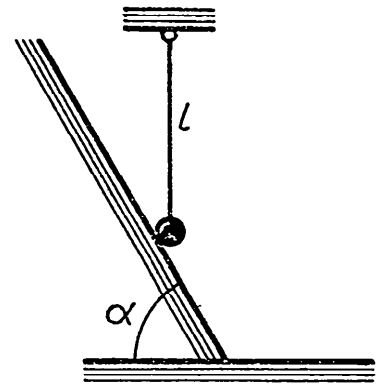


Рис. 5.3.

сдоль плоскости вверх. Угол наклона плоскости к горизонту, начиная с которого шайба скользит по плоскости, равен $\alpha_0 < \alpha$. С какой скоростью шайба вернется в исходную точку?

5.15. С какой высоты может прыгнуть акробат на упругую сетку, если она выдерживает перегрузку $5g$? Статический прогиб сетки $x_0 = 0,20$ м. Чему равна максимальная скорость акробата при движении, если его масса равна $m = 70$ кг и коэффициент упругости сетки $k = 980$ Н/м? Массой сетки пренебречь.

5.16. На тросе с коэффициентом упругости $k = 49$ кН/м равномерно опускается груз массой $m = 4 \cdot 10^3$ кг со скоростью $v = 4$ м/с. В некоторый момент времени верхний конец троса останавливают. Найти максимальную силу натяжения троса при торможении груза до полной остановки.

5.17. На столе, свисая на $1/3$ в небольшое отверстие стола, лежит на грани скольжения цепочка массой m и длиной $3l$.
а) Какую работу нужно совершить, чтобы цепочку втащить на стол горизонтальной силой, прикладывая ее к концу цепочки?
б) Какую скорость будет иметь цепочка в момент отрыва от стола, если цепочку вывести из положения равновесия ничтожно малой силой и она начнет соскальзывать?

5.18. Два мальчика массами M каждый стоят на коньках на льду на расстоянии l друг от друга. Один из них бросает мяч массой m , второй ловит его налету. Максимальная высота, которой достигает мяч при полете, равна h , коэффициент трения между коньками и льдом f . Определите: расстояние, на которое откатится мальчик, бросивший мяч; работу, которую он совершил.

5.19. Пуля массой m , летящая горизонтально со скоростью v , попадает по линии центра в однородный шар массой M и радиусом r , находящийся на гладкой горизонтальной поверхности. Происходит неупругий удар, в результате чего пуля проходит по диаметру через весь шар и застревает у его поверхности. Определите среднюю силу сопротивления движению пули.

5.20. Мяч падает на пол с высоты h и отскакивает от него. Полагая, что при каждом ударе n -я часть кинетической энергии мяча переходит в тепло, определите: через сколько времени мяч остановится; путь, пройденный мячом за время движения.

5.21. На легких стержнях длиной l висят два шара массами M и $2M$. Стержни могут вращаться свободно в вертикальной плоскости. Между шарами вставлена небольшая пружина с коэффициентом упругости k . С какой силой нужно сжать пружину, чтобы при восстановлении деформации стержень с более легким шаром стал в вертикальное положение? Массой пружины пренебречь.

5.22. Кубик массой m соскальзывает без начальной скорости с вершины незакрепленной горки массой M и высотой h (рис. 5.4). В конце спуска кубик ударяет о пружину с коэффициентом упругости k и сжимает ее. Чему равно ускорение горки в момент наибольшей деформации пружины? Решите задачу при условии, что начальная скорость кубика была равна v_0 .

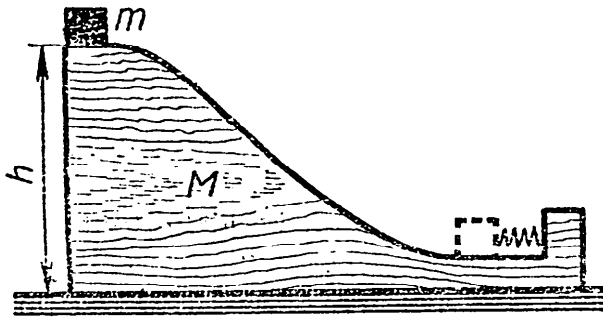


Рис. 5.4.

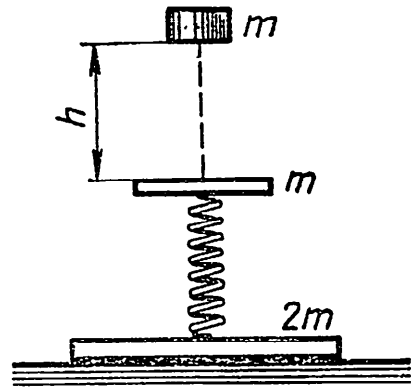


Рис. 5.5.

5.23. Две пластинки массами m и $2m$ соединены легкой пружиной с коэффициентом упругости k (рис. 5.5). а) С какой высоты h должен упасть на верхнюю пластинку липкий грузик массой m , чтобы при растяжении пружины после удара нижняя пластинка оторвалась от стола? б) На какую высоту от начального уровня поднимутся после удара грузик и верхняя пластинка?

5.24. Прямоугольный равнобедренный клин массой m лежит на гладком горизонтальном столе (рис. 5.6). На наклонных гранях клина находятся два груза массами $2m$ и m , соединенные между собой нитью, перекинутой через блок. В начальный момент времени меньший груз удерживают у основания наклонной плоскости, а затем отпускают. Пренебрегая трением, определите скорость этого груза на вершине клина. Чему будет равна эта скорость при закреплённом клине?

5.25. Два шара массами m_1 и m_2 , летящие навстречу друг другу со скоростями v_1 и v_2 , сталкиваются, и происходит центральный упругий удар. а) Определите скорости шаров после соударения. б) Исследуйте полученный результат в зависимости от соотношения между массами и скоростями шаров, найдите условие, при котором происходит наибольшая передача кинетической энергии. в) Найдите импульс и энергию каждого шара в системе отсчета, связанной с их центром масс, суммарную кинетическую энергию шаров.

5.26. На гладком столе лежит пробирка длиной l и массой M . В открытый конец пробирки со скоростью v_0 , направленной вдоль оси пробирки, влетает упругий шарик массой m . Шарик отражается от закрытого конца пробирки и летит назад. Через сколько времени шарик вылетит из пробирки? Какое расстояние он пролетит за это время?

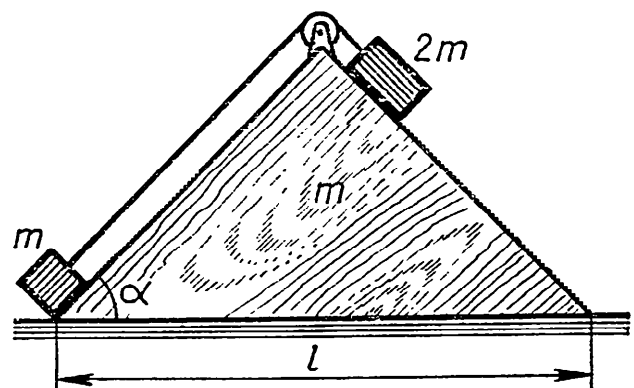


Рис. 5.6.

5.27. Клин массой M лежит на гладкой горизонтальной поверхности. На грань, образующую с горизонтом угол α , с вы-

соты h падает шарик массой m . Определите скорость клина после упругого удара шарика.

5.28. Три небольших гладких шара A , B и C лежат на одной прямой на расстоянии l друг от друга, их массы равны M , m и M . В некоторый момент времени шарам сообщают скорости в одном направлении, равные соответственно v , $4v$ и v . Шар B догоняет A и отлетает к C . Полагая соударение упругим, определите расстояние между шарами A и C в тот момент, когда шар B подлетит к шару C . Каковы будут установившиеся скорости шаров A и C при $m \ll M$?

5.29. Три упругих шара одинакового радиуса висят, касаясь друг друга, на трех параллельных нитях длиной l . Массы шаров равны m , m и $2m$. Шар массой $2m$ отклонили на угол $\alpha = 60^\circ$ по направлению, перпендикулярному прямой, соединяющей центры двух других шаров, и отпустили. Определите: а) скорости шаров после удара; б) скорости шаров после удара при условии, что в момент удара один из покоящихся шаров убрали.

5.30. Маятник длиной l с грузом массой m на конце совершает колебания в вертикальной плоскости. Зная максимальный угол отклонения нити от вертикального положения φ_0 , определите: а) силу натяжения нити, нормальное и тангенциальное ускорения в функции угла φ , образуемого нитью с вертикалью; б) положение нити, при котором ее натяжение равно mg ; в) положение нити, при котором полное ускорение груза направлено вертикально вверх и горизонтально.

5.31. Гирька массой $m = 0,1$ кг, привязанная к легкой нерастяжимой нити, описывает окружность в вертикальной плоскости. Скорости гирьки в верхней и нижней точках траектории равны соответственно $v_1 = 4$ м/с и $v_2 = 6$ м/с. Определите натяжение нити и ускорение гирьки в те моменты, когда нить расположена: а) вертикально; б) горизонтально.

5.32. По условию задачи 5.29 найдите натяжение нитей: а) в момент наибольшей деформации шариков; б) в момент приобретения ими наибольшей скорости.

5.33. Небольшая шайба скользит по желобу, переходящему в «мертвую петлю» радиусом R . Высота, с которой была пущена шайба, является минимальной высотой, обеспечивающей прохождение всей петли.

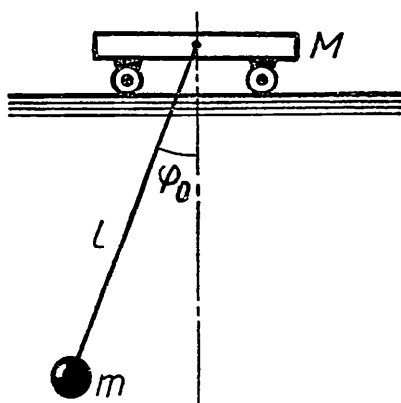


Рис. 5.7.

а) По какому закону изменяется сила давления шайбы в зависимости от высоты h , на которой она находится? б) Чему равны максимальное и минимальное ускорения шайбы?

5.34. Мяч радиуса r лежит на краю стола. Ничтожно малой силой его вывели из положения равновесия, и он начал падать со стола без скольжения. Высота стола $H \gg r$. На каком расстоя-

нии от стола мяч ударится об пол?

5.35. На доске массой M , лежащей на гладком горизонтальном столе, укреплен легкий штатив к которому на нити длиной l подвешен шарик массой m . В шарик попадает дробинка массой m , летящая в горизонтальном направлении, и застревает в нем. а) При какой минимальной скорости дробинки нить сделает полный оборот при закрепленной доске? б) Чему будет равна эта скорость, если доску не удерживать? Какое натяжение будет испытывать нить в горизонтальном положении в этом случае?

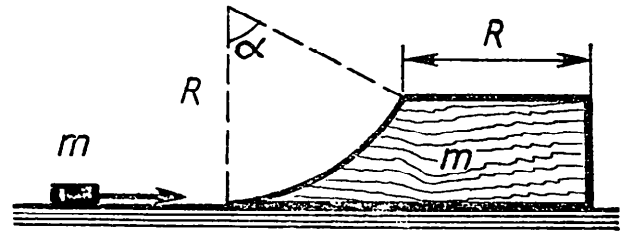


Рис. 5.8.

5.36. Невесомый стержень длиной $2l$, на концах которого находятся два шара массами M , расположен под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту и может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси, проходящей через его середину. В верхний шар попадает пуля массой $m \ll M$, летящая горизонтально в плоскости, перпендикулярной оси. Скорость пули перед ударом v_0 . Считая удар абсолютно неупругим, определите максимальное натяжение стержня при его движении.

5.37. На гладкой горизонтальной поверхности находится тележка массой M . К тележке привязана нить длиной l , на конце которой укреплена гирька массой $m \ll M$. Гирьку отклонили на угол φ_0 и отпустили (рис. 5.7). Определите: а) максимальное расстояние, на которое откатывается тележка от положения равновесия; б) скорость тележки и натяжение нити в тот момент, когда нить образует с вертикалью угол $\varphi < \varphi_0$.

5.38. Маятник, состоящий из легкой нити длиной l и тяжелого грузика, установлен в лифте, который поднимается вверх с ускорением $1/3 g$. Маятник может свободно вращаться в вертикальной плоскости. В нижнем положении грузику сообщают скорость $v_0 = 2\sqrt{gl}$. На какую максимальную высоту поднимется грузик от своего начального положения в лифте?

5.39. Какую скорость нужно сообщить шайбе в горизонтальном направлении, чтобы она перелетела через доску (рис. 5.8)? Трением между шайбой и доской, а также между доской и столом пренебречь. Угол $\alpha = 60^\circ$, размеры доски указаны на рисунке. Чему равно максимальное ускорение доски при скольжении шайбы?

§ 6. Статика

6.1. Груз массой M подвешен на нитях длиной l , концы которых прикреплены к двум муфтам массами m , насаженным на стержень (рис. 6.1). Коэффициент трения между муфтами и стержнем равен f . При каких расстояниях x между муфтами система может находиться в равновесии?

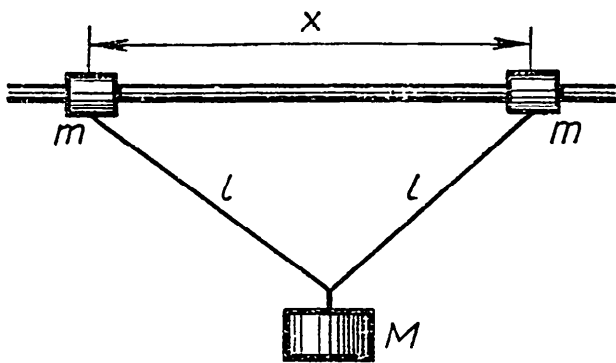


Рис. 6.1.

вым? При каком соотношении между массами шариков нить в положении равновесия расположена горизонтально?

6.3. Гладкий однородный куб массой m и ребром a лежит на наклонной плоскости и упирается в наклонную стенку, как указано на рисунке 6.3. Угол между плоскостью и стенкой равен 45° . Найдите: а) силу давления F_1 куба на стенку; б) равнодействующую сил давления F_2 на наклонную плоскость и точку приложения равнодействующей F_2 .

6.4. Какую силу должен приложить человек массой m к ящику массой $M > m$, чтобы сдвинуть его с места? Коэффициент трения между ящиком и полом, а также между подошвами и полом равен f . При каком значении f эта сила будет минимальной?

6.5. Ящик поднимают по наклонной доске. Коэффициент трения между ящиком и доской равен f . Под каким углом к горизонту нужно поставить доску, чтобы легче было тащить ящик? Какую силу при этом нужно приложить к ящику, если масса его m ?

6.6. Три гладкие одинаковые трубы лежат в углу ящика, как это указано на рисунке 6.4. В каких пределах можно менять угол φ , чтобы трубы не раскатывались?

6.7. Через два неподвижных вала перекинут трос, к концу которого подвешен груз массой m (рис. 6.5). Коэффициент трения между валом и тросом равен f . Какую силу F нужно приложить к свободному концу троса, чтобы удержать груз в равновесии? чтобы равномерно поднимать вверх? Необходимые размеры указаны на рисунке.

6.8. Однородный диск массой 5 кг находится на наклонной плоскости на грани скольжения, как указано на рисунке 6.6. Угол $\alpha = 30^\circ$. Определите силу натяжения нити и коэффициент трения между плоскостью и диском.

6.9. Каток радиусом r и массой m находится на асфальтовой дорожке, составляющей с горизонтом угол α . Коэффициент

6.2. Из проволоки сделана рамка в форме прямоугольного треугольника с острым углом α (рис. 6.2). По проволоке без трения могут скользить два шарика массами m и $3m$, связанные нитью. Чему равно натяжение нити и угол φ , образуемый нитью с одной из проволок в положении равновесия? Является ли это равновесие устойчивым?

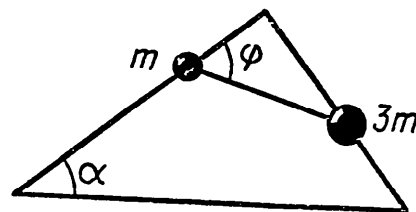


Рис. 6.2.

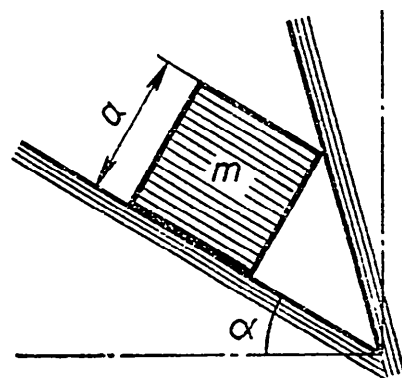


Рис. 6.3.

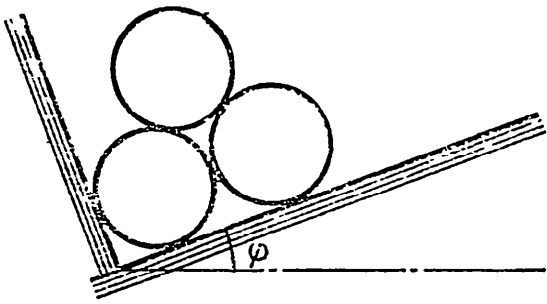


Рис. 6.4.

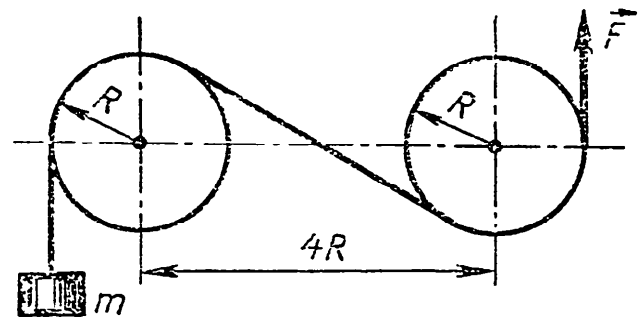


Рис. 6.5.

трения качения катка равен μ . а) Какую силу нужно приложить к катку вдоль поверхности дорожки, чтобы его удержать в равновесии? чтобы его катить вверх без скольжения? б) Как должны быть связаны между собой коэффициент трения скольжения f и качения μ , чтобы качение катка происходило без скольжения?

6.10. На горизонтальном столе лежит брусок массой m . Высота бруска a , длина b . а) При каком максимальном коэффициенте трения брусок можно двигать по столу силой, направленной горизонтально и приложенной к верхнему ребру? б) Какую минимальную силу нужно приложить к бруску, чтобы его опрокинуть через ребро?

6.11. Какова минимальная длина каждой из двух нитей, чтобы на них можно было бы повесить шестигранный брусок у стены так, как указано на рисунке 6.7? Коэффициент трения между стеной и бруском равен f .

6.12. Две тонкие палочки, массы которых M и m , установлены под прямым углом (рис. 6.8). Угол α известен. Палочки могут свободно вращаться в шарнирах A и B . При каком минимальном коэффициенте трения между палочками система будет находиться в равновесии? Какова при этом сила давления, действующая на шарнир A ?

6.13. Однородный куб прислонен к стене в наклонном положении так, что между стеной и гранью куба образуется угол α . Каково

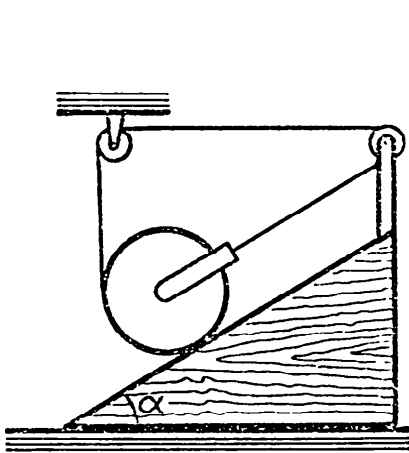


Рис. 6.6.

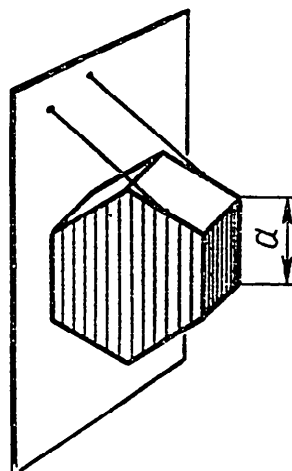


Рис. 6.7.

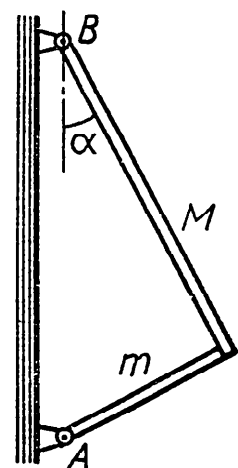


Рис. 6.8.

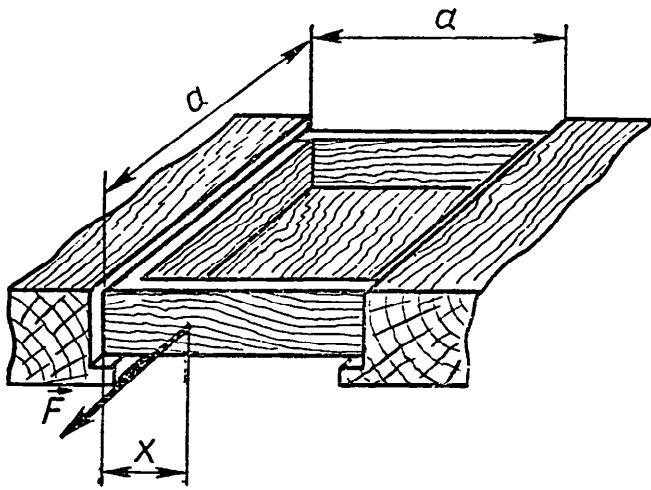


Рис. 6.9.

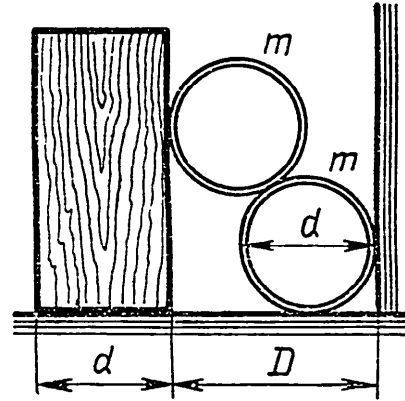


Рис. 6.10.

может быть максимальное значение этого угла, если коэффициент трения между кубом и стеной, а также между кубом и полом равен f ?

6.14. Стол снабжен выдвигающимся ящиком, размеры которого указаны на рисунке 6.9. Коэффициент трения между трущимися поверхностями ящика и пазов равен f . В каких точках нужно прикладывать к ящику силу F , чтобы его выдвинуть?

6.15. Два одинаковых гладких кольца массой m и диаметром d лежат между стеной и однородным бруском толщиной d , находящимися на расстоянии D (рис. 6.10.) Определите минимальные значения массы бруска и силы трения между бруском и полом, при которых возможно равновесие системы.

6.16. В цилиндрическом желобе радиуса $7R$ лежат три одинаковых бревна радиусом R (рис. 6.11). Трение о желоб велико. При каком минимальном коэффициенте трения между бревнами они не раскатятся? Анализируя полученный ответ, определите коэффициент трения в случае, когда радиус желоба бесконечно велик (плоская опора).

6.17. Однородная проволока согнута под углом α и подвешена на легкой нити так, как это указано на рисунке 6.12. Какой угол с горизонтом составляет нижняя часть проволоки?

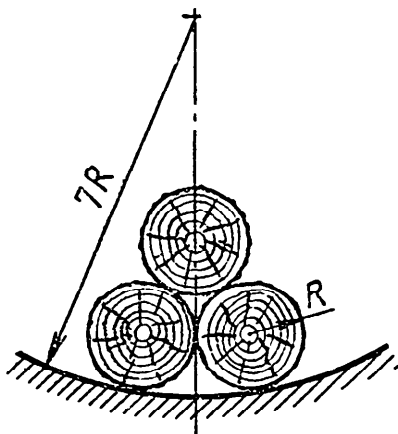


Рис. 6.11.

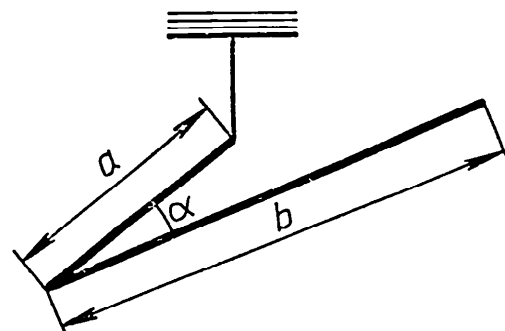


Рис. 6.12.

6.18. Два однородных стержня массами m и M и длиной соответственно l и L жестко скреплены под прямым углом друг с другом и подвешены в точке O (рис. 6.13). На какой угол α отклонится горизонтальный стержень, если к его концам подвесить грузы массами m и M ?

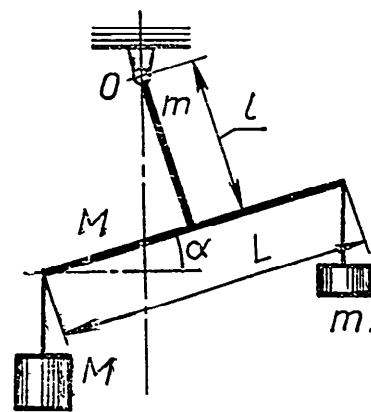


Рис. 6.13.

6.19. Определите положение центра масс: а) однородной проволоки длиной l , изогнутой по дуге окружности радиусом R ; рассмотрите случаи, когда $R > \frac{l}{\pi}$, $l = \frac{\pi R}{2}$ (четверть кольца), $l = \pi R$ (половина кольца); б) однородной пластинки, имеющей форму сектора радиусом R с центральным углом α .

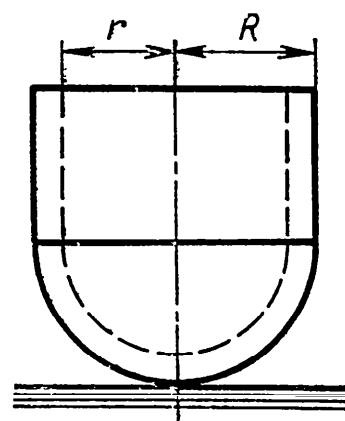


Рис. 6.14.

6.20. Апельсин радиусом R разломан на n частей. а) Найдите центр тяжести дольки апельсина. б) Решите задачу для случая $n = 4$, $n = 2$.

6.21. Найдите предельную высоту цилиндра, укрепленного на полушарии, при которой система теряет устойчивость (рис. 6.14). Внешний и внутренний радиусы полушария и цилиндра равны R и r . Плотность тел одинакова.

6.22. Идеально гладкий однородный шар массой m лежит на горизонтальном столе. Шар разрезали на четыре равные части двумя вертикальными плоскостями и соединили нитью по большому горизонтальному кругу. Определите натяжение нити.

§ 7. Динамика твердого тела

7.1. Однородный цилиндр, масса которого m и радиус r , начинает вращаться вокруг горизонтальной оси под действием груза массой m (рис. 7.1). Найдите: а) закон вращения цилиндра; б) показания динамометра. Решите задачу при условии, что к динамометру подвешен груз, а цилиндр опускается на нити.

7.2. К концам легкой нити, перекинутой через блок массой $m_1 = 0,1$ кг и радиусом $r = 0,1$ м, подвешены два груза массами $m_2 = 0,2$ кг и $m_3 = 0,3$ кг. Грузы установлены на одной высоте. Предоставленная самой себе система приходит в движение. Пренебрегая трением на оси блока и проскальзыванием нити, определите: а) время, по истечении которого расстояние между грузами станет равным $H = 5,5$ м; б) показания динамометра, к которому подвешен блок; в) момент импульса системы, когда расстояние между грузами равно H .

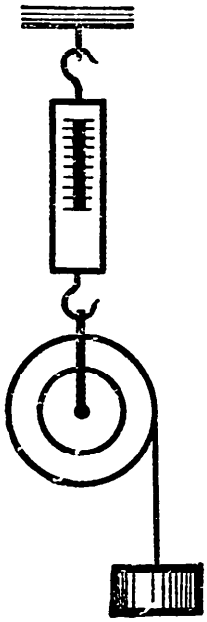


Рис. 7.1.

7.3. Тяжелое колесо, масса которого m_1 сосредоточена на ободе, может вращаться вокруг неподвижной оси. Радиус колеса R . С колесом связан легкий шкив радиусом r , на который намотана нить с грузом массой m_2 на конце. Момент сил трения на оси равен $M_{\text{тр}}$. Предоставленная самой себе система приходит в ускоренное движение. Определите: а) силу натяжения нити и давление на ось; б) момент импульса системы, когда груз опустился на расстояние H .

7.4. При выстреле орудия снаряд вылетел из ствола с угловой скоростью $\omega = 200$ 1/с под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Момент инерции снаряда относительно его продольной оси $I = 15$ кг·м², расстояние между колесами орудия $l = 1,5$ м, время движения снаряда в стволе $t = 2 \cdot 10^{-2}$ с. На сколько отличаются силы давления земли, действующие на колеса во время выстрела?

7.5. Полый шар массой $m = 0,5$ кг имеет внешний радиус $R = 0,08$ м и внутренний $r = 0,06$ м. Шар вращается вокруг оси, проходящей через его центр. В некоторый момент времени на шар начинает действовать сила, в результате чего угол поворота шара изменяется по закону $\varphi = 2 + 2t - t^2$. Определите изменение момента импульса шара за время торможения; момент приложенной силы.

7.6. Диск массой m и радиусом R вращается вокруг своей оси с угловой скоростью ω_0 . С диском жестко связан тормозной барабан радиусом r , к которому прижимается тормозная колодка. Определите, сколько оборотов сделает диск до полной остановки, если колодку прижимать силой, изменяющейся по закону: а) $F = \text{const}$; б) $F = kt$; в) $F = k\omega$. Коэффициент трения скольжения между барабаном и колодкой равен f .

7.7. Вал радиусом r катится по тонкой горизонтальной ленте, в результате чего лента наматывается на вал. Ширина ленты a толщина b , плотность ρ . По какому закону должен измениться с течением времени вращающий момент, действующий на вал, чтобы он двигался равномерно с угловой скоростью ω ? С какой скоростью будет при этом перемещаться ось вала?

7.8. Диск радиусом R , вращающийся со скоростью n оборотов в минуту вокруг своей геометрической оси, кладут плашмя на горизонтальную поверхность. Коэффициент трения между диском и поверхностью равен f . Сколько оборотов сделает диск до остановки?

7.9. Межпланетная станция имеет форму кольца с внешним радиусом R . Для создания искусственного поля тяжести станция приводится во вращение вокруг оси симметрии. С этой целью на внешнем ободе кольца (на противоположных концах диаметра) установлены два ракетных двигателя. Относительная скорость истечения газов u направлена по касательной к кольцу и с течением

времени по величине не изменяется, общий секундный расход топлива $\mu = \text{const}$, начальный момент инерции станции вместе с горючим равен I_0 . Через сколько времени после включения двигателей тела на станции будут весить так же, как и на Земле?

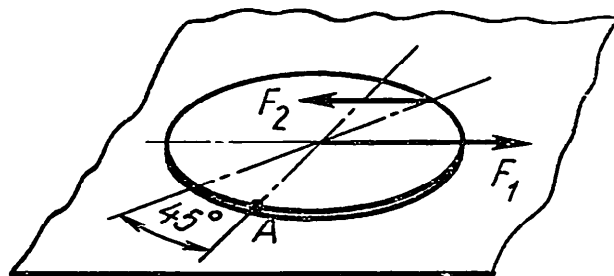


Рис. 7.2.

7.10. Однородный стержень массой m подвешен за концы горизонтально на двух нитях. а) Какое натяжение испытывает одна из нитей в момент обрыва другой? б) Каково натяжение нити, если перед обрывом стержень составлял с горизонтом угол α ?

7.11. На идеально гладкой доске лежит пластинка массой m . К пластинке приложили две силы F_1 и F_2 (рис. 7.2). Как будет двигаться пластинка? По какому закону меняется с течением времени полное ускорение точек обода, проходящих положение A ? Рассмотрите случаи, когда $F_1 > F_2$, $F_1 = F_2$ и $F_1 < F_2$.

7.12. Тележка, имеющая четыре колеса массой m , находится на горизонтальном столе. Масса тележки без колес M . К тележке привязана нить с грузом массой $2M$ на конце. Нить перекинута через неподвижный блок, укрепленный на краю стола, и вся система находится в движении. Полагая колеса однородными дисками, катящимися без скольжения, и пренебрегая трением качения, определите натяжение нити.

7.13. Обруч радиусом r , вращающийся вокруг своей оси с угловой скоростью ω_0 , положили на шероховатую ленту транспортера, движущуюся горизонтально со скоростью v_0 . Коэффициент трения скольжения между обручем и лентой равен f . Определите время, по истечении которого качение обруча будет происходить без скольжения, а также скорость оси обруча при этом движении. Рассмотрите случаи: а) когда $\omega_0 r < v_0$; б) $\omega_0 r > v_0$.

7.14. Однородный шар радиусом r , вращающийся с большой угловой скоростью ω_0 , положили на горизонтальный стол так, что ось вращения оказалась наклоненной под углом φ к нормали стола. а) Определите скорость v центра шара, которая установится после того, как его проскальзывание по столу прекратится. Трением качения пренебречь. б) Какое расстояние s пройдет шар, прежде чем его движение будет чистым вращением, если коэффициент трения между шаром и плоскостью равен f ? в) Чему равно это расстояние, если шар положить на плоскость, наклоненную под углом α к горизонту?

7.15. Биллиардный шар, катящийся без скольжения со скоростью v , ударяет по линии центров в такой же неподвижный шар. Пренебрегая трением между шарами, определите скорости шаров после удара.

7.16. На двух горизонтальных параллельных рейках лежит диск массой m с двумя небольшими выступами (рис. 7.3), момент инер-

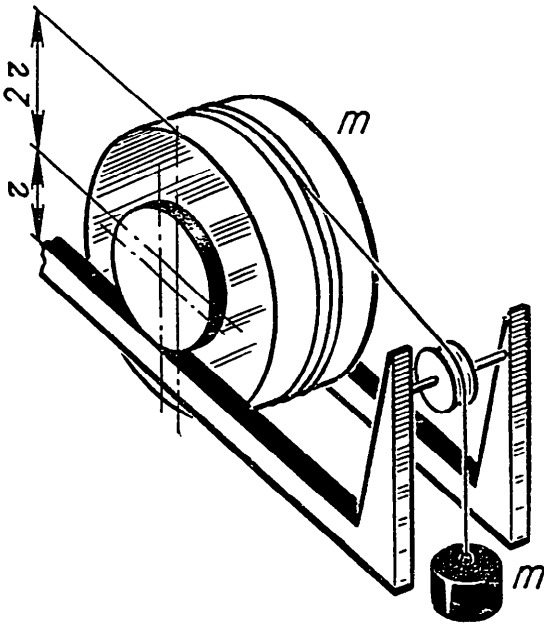


Рис. 7.3.

ции которых можно не учитывать. На диск намотана легкая нить с грузом массой m на конце. Предоставленная самой себе, система приходит в ускоренное движение. Зная коэффициент трения качения μ , определите: а) минимальное значение коэффициента трения скольжения f , при котором происходит чистое качение; б) скорость оси диска в функции времени.

7.17. На горизонтальной плоскости лежит катушка ниток массой m (рис. 7.4). Момент инерции катушки относительно ее оси равен I . Нитку тянут с силой F . Коэффициент трения скольжения между катушкой и плоскостью равен f . Определите: а) при каких значениях угла α катушка будет двигаться вправо, влево; б) при каком значении f катушка не будет скользить по плоскости при ее качении вправо; в) какую силу F_0 и под каким углом α_0 нужно приложить к катушке, чтобы она двигалась с максимальным ускорением, не вращаясь.

7.18. Маятник Максвелла состоит из диска массой M , плотно насаженного на ось массой m , подвешенную на двух нитях длиной l (рис. 7.5). Радиус диска R , радиус оси $r \ll l$. На ось намотали половину длины нити, затем маятник отпустили. Определите: а) максимальную скорость точек O , B и C ; б) период колебаний оси маятника. Получив ответ, рассмотрите частный случай: $M = m = m_0/2$, $r = R$.

7.19. Барабан радиусом R плотно надет на трубу радиусом $r = R/2$, подвешенную на двух тросиках (рис. 7.6). На барабан намотан тросик с грузом на конце, и вся система находится в равновесии. Масса системы M , радиус инерции системы $\rho = \frac{\sqrt{2}}{2}R$.

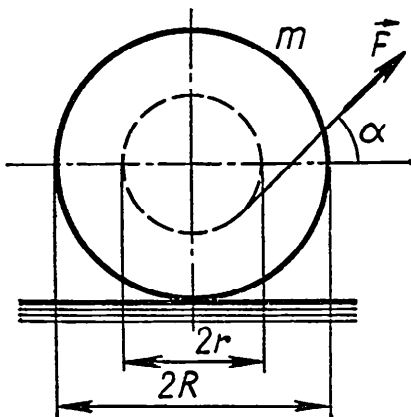


Рис. 7.4.

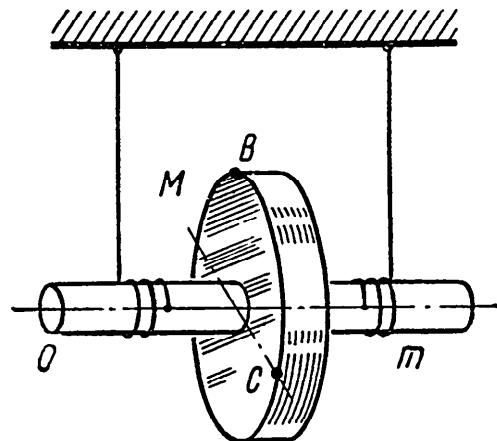


Рис. 7.5.

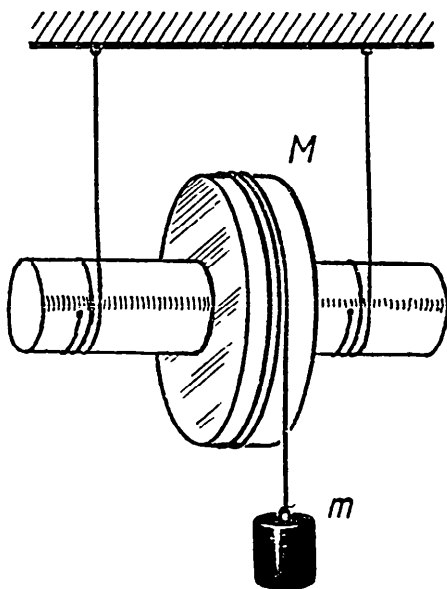


Рис. 7.6.

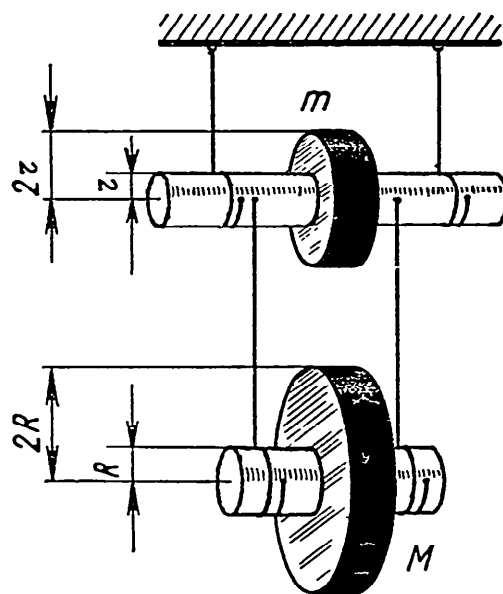


Рис. 7.7.

Пренебрегая массой тросиков, определите массу груза. С каким ускорением будут двигаться барабан и груз и какое натяжение испытают тросики, если массу груза увеличить (уменьшить) вдвое?

7.20. Маятник Максвелла с диском массой M и радиусом $2R$ подвешен на маятнике радиусом $2r$ и массой m (рис. 7.7). Радиусы осей маятников равны соответственно R и r , и массой их можно пренебречь. Все нити намотаны на оси в одну сторону. С каким ускорением будут перемещаться оси маятников, если систему предоставить самой себе? Каково при этом натяжение нитей?

7.21. Два диска, соединенные нитью, намотанной на их оси, катятся без скольжения по наклонным граням клина (рис. 7.8). Массы дисков m и $2m$, радиусы дисков и их осей одинаковы и соответственно равны $2r$ и r . Массы нити, блока и осей ничтожно малы, трением на блоке и трением качения можно пренебречь. Определите натяжение нити и ускорения осей дисков.

7.22. Тонкая упругая лента массой m свернута в кольцо радиусом R и вращается с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси, проходящей по диаметру. Определите натяжение нити, соединяющей противоположные точки горизонтального диаметра.

7.23. Ракета массой m выпущена под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0 . Точка старта находится на высоте H от поверхности Земли. Определите изменение момента импульса ракеты относительно точки старта к тому времени, когда ракета: а) достигнет верхней точки траектории; б) окажется на одном уровне с точкой бросания; в) падает на Землю.

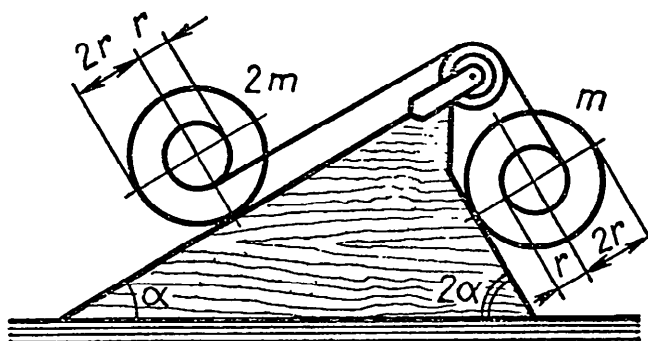


Рис. 7.8.

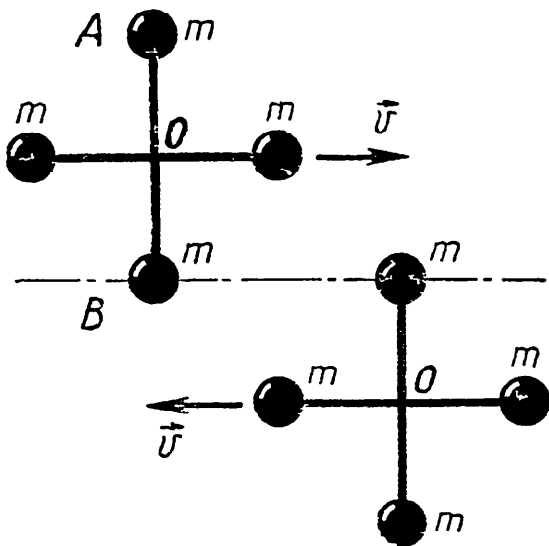


Рис. 7.9.

7.24. Две системы шаров массами m соединены жестко невесомыми стержнями длиной l (рис. 7.9). Системы скользят поступательно по гладкой горизонтальной поверхности навстречу друг другу со скоростями v . В некоторый момент времени шары упруго соударяются. Определите: а) суммарный момент импульса шаров относительно точек A и B , а также произвольной точки C ; б) линейную скорость центра O и угловую скорость ω_0 вращения крестовин вокруг центра после удара.

в) Решите задачу при условии, что одновременно соударяются две пары шаров.

7.25. На тонкой пластинке лежат два шара с массами M , соединенные между собой легким стержнем длиной l . Снизу вертикально вверх в них стреляют из пистолета пулей массой m . Пробив пластинку, пуля застревает в шаре. Зная, что при ударе о шар пуля имела скорость v_0 , получите закон движения центра масс системы. Определите: а) положение стержня в момент наибольшего подъема центра масс; б) натяжение стержня в этом положении.

7.26. Человек стоит посередине скамьи Жуковского, вращающейся вокруг вертикальной оси со скоростью $0,5$ об/с. В руках человека находится однородный стержень длиной $2,0$ м и массой 12 кг. Стержень расположен перпендикулярно оси вращения, и его середина совпадает с осью вращения. Если человек быстро поворачивает стержень, совмещая его с осью вращения, вся система начинает вращаться со скоростью 1 об/с. Оцените момент инерции человека, если момент инерции скамьи равен $1,0$ кг·м². Какую работу совершил человек, изменяя положение стержня?

7.27. Доска длиной l и массой M может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси (рис. 7.10). В середину доски по нормали к ней попадает пуля массой $m \ll M$, летевшая со скоростью v_0 , и застревает в доске. Определите силу давления доски на подшипник. На каком расстоянии от оси вращения пуля должна попасть в доску, чтобы во время удара ось не испытывала добавочной нагрузки?

7.28. Тонкий стержень массой M и длиной l стоит на гладком горизонтальном столе в положении неустойчивого равновесия. В верхний конец стержня попадает пуля массой $m \ll M$ и застревает в нем. При какой минимальной

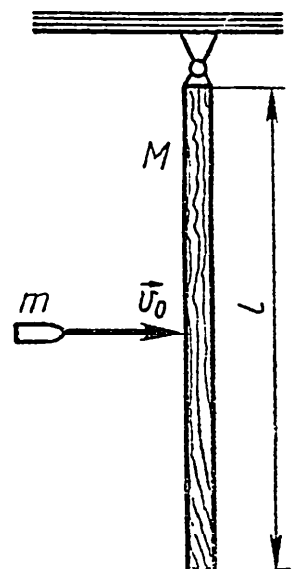


Рис. 7.10.

скорости пули нижний конец стержня оторвется от стола?

7.29. Карманные часы лежат на горизонтальном столе. Как изменился бы ход часов, если бы трение между часами и столом стало ничтожно малым? При решении считать, что ось маятника проходит через центр инерции часов и что момент инерции часов в 500 раз больше момента инерции маятника.

7.30. Небольшая деревянная пластинка массой M и радиусом R плавает в воде. На краю пластинки сидит жук массой m . На какой угол повернется пластинка, если жук переползет из точки A в точку B по краю пластинки (рис. 7.11)? На какое расстояние сместится при этом жук?

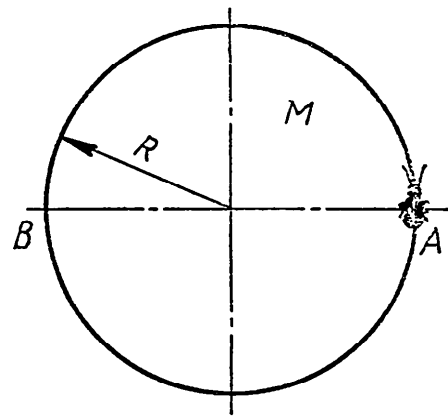


Рис. 7.11.

7.31. Какую работу нужно совершить, чтобы закатить бочку весом 10^4 Н и радиусом 1 м по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 45° , на высоту 15 м, если коэффициент трения качения равен $2,5 \cdot 10^{-2}$ м?

7.32. Ящик массой m , имеющий в основании квадрат с ребром l , лежит на горизонтальном полу. Коэффициент трения между ящиком и полом равен f . Какую работу нужно совершить, чтобы ящик повернуть на угол $\alpha = 90^\circ$, не отрывая его от пола, вокруг оси, проходящей через: а) одно из ребер; б) его центр?

7.33. Вагонетку весом 8 кН поднимают лебедкой со скоростью 0,5 м/с по наклонной эстакаде, образующей с горизонтом угол 30° . Диаметр колес вагонетки 0,500 м, диаметр цапф осей 0,080 м. Коэффициент трения качения колес $5 \cdot 10^{-4}$ м, коэффициент трения скольжения в цапфах равен 0,15. Определите мощность лебедки, расходуемую на подъем вагонетки. Массой колес по сравнению с массой вагонетки можно пренебречь.

7.34. Шар радиусом 2,5 см и массой 100 г катится без скольжения по двум кольцевым рельсам, расположенным в горизонтальной плоскости. Радиус кривизны наружного рельса 100 см, расстояние между рельсами 3 см. Шар делает полный оборот за 30 с. Определите момент импульса шара и его кинетическую энергию.

7.35. Обручу массой m , стоящему на полу, сообщили поступательную скорость v без вращения. Пренебрегая трением качения, найдите энергию, которая будет израсходована на преодоление трения к моменту, когда движение перейдет в чистое качение.

7.36. На вал радиусом r намотана легкая нить с грузом массой m на конце. Длина нити l . Предоставленная самой себе система приходит в ускоренное движение, груз опускается, а затем вследствие вращения вала поднимается на высоту $h < l$. Определите момент сил трения, действующих на оси вала. Чему равен момент инерции вала, если время движения системы оказалось равным t ?

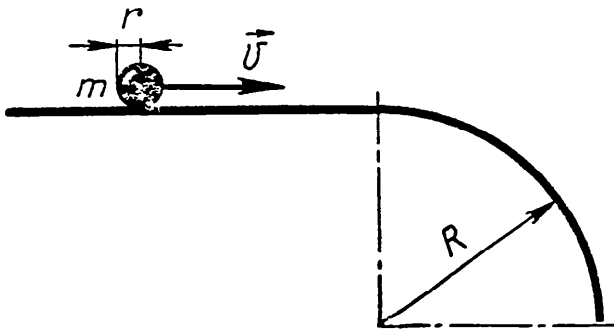


Рис. 7.12.

7.37. Через блок массой m , который можно считать цилиндром, перекинута веревка длиной l и массой m , причем вся система находится в равновесии. Ничтожно малой силой систему выводят из положения равновесия, и веревка начинает опускаться без проскальзывания. а) Пренебрегая трением на оси блока и его размерами по

сравнению с l , определите скорость веревки при ее отрыве от блока. б) Найдите скорость веревки, полагая, что в начальный момент блок неподвижен, а больший из свешивающихся концов веревки имеет длину x . Размеры блока соизмеримы с l и его радиус равен r .

7.38. Шарик массой m и радиусом r катится без скольжения со скоростью v по горизонтальной поверхности, переходящей в цилиндрическую радиусом R (рис. 7.12). Какое расстояние пройдет шарик по цилиндру, прежде чем он от него оторвется?

7.39. Обруч массой m висит на горизонтальной оси. Обруч отклонили на угол φ_0 и отпустили. По какому закону в зависимости от угла φ будет меняться сила давления обруча на ось при его качании?

7.40. Тонкий стержень массой m и длиной l шарнирно закреплен на одном конце и может вращаться в вертикальной плоскости. Стержень отвели в горизонтальное положение и отпустили. Найдите: а) скорость центра масс стержня при прохождении положения равновесия; б) как меняется натяжение стержня по его длине во время движения. Трением в шарнире пренебречь.

7.41. Стержень массой m и длиной l стоит вертикально на идеально гладкой горизонтальной поверхности. Легким толчком стержень выводят из положения неустойчивого равновесия. Определите: а) момент импульса стержня относительно точки опоры в момент его удара о плоскость; б) траекторию конца стержня.

7.42. Тонкий прут массой m и длиной l , закрепленный на конце в шаровом шарнире, описывает конус, с углом раствора 2α . а) Какую работу пришлось совершить, чтобы раскрутить прут? б) Чему равно его максимальное натяжение?

7.43. Автомобиль массой M в момент отключения трансмиссии имел скорость v . Масса каждого из четырех колес автомобиля равна m , радиус колеса r , радиус инерции колес относительно оси, проходящей через их центр тяжести, равен ρ , коэффициент трения качения равен μ . Какой путь пройдет автомобиль «накатом» до полной остановки?

7.44. Бревно массой m и радиусом r скатывается без начальной скорости с наклонной плоскости с высоты $h \geq r$ и затем катится по горизонтальной поверхности. Плоскость образует с горизонтом угол α . Коэффициент трения качения между бревном и наклонной

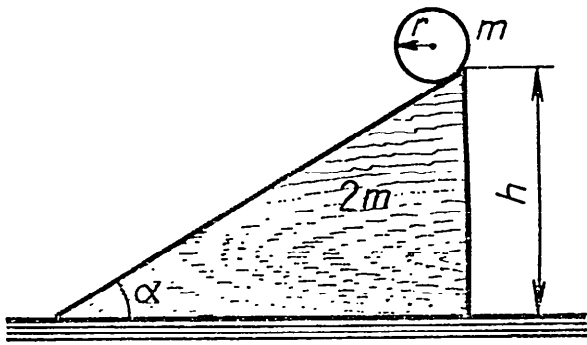


Рис. 7.13.

клином и столом ничтожно мало. Каковы скорость и ускорение клина в тот момент, когда цилиндр окажется у основания клина? Трением качения и проскальзыванием цилиндра пренебречь.

7.45. Диск массой m и радиусом R вращается вокруг вертикальной оси со скоростью n_1 на гладком столе. На этот диск кладут другой диск массой $2m$ и радиусом $R/2$, вращающийся со скоростью $n_2 > n_1$ в ту же сторону, что и первый. Оси вращения дисков совпадают. Коэффициент трения между дисками равен f . Определите: а) изменение кинетической энергии системы к тому моменту, когда закончится проскальзывание дисков; б) время, в течение которого происходит проскальзывание. Рассмотрите случай, когда первый диск покоится и его масса $m_1 \gg 2m$, т. е. вращающийся диск кладут на шероховатый горизонтальный пол.

7.47. На легкой нити подвешена пружина массой M и радиусом R , способная свободно вращаться вокруг вертикальной оси (рис. 7.14). Шаг винтовой линии пружины равен h . На пружину надето небольшое кольцо массой m . Сначала всю систему удерживают в равновесии, затем в некоторый момент времени систему предоставляют самой себе и кольцо начинает без трения скользить по пружине. Определите угловую скорость и ускорение пружины в тот момент, когда кольцо сделает по пружине n оборотов.

7.48. Диск радиусом R и массой M может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси, проходящей по нормали к диску и отстоящей от его центра на расстоянии $R/2$. В диск по направлению горизонтального диаметра попал шарик массой $m \ll M$, в результате чего диск стал вращаться вокруг оси. Считая удар неупругим, определите минимальное значение скорости шарика, при которой диск в верхнем положении не давит на ось.

7.49. Пуля массой m , летящая горизонтально со скоростью v , попадает в шар массой $M \gg m$ и радиусом R и застревает в шаре. Шар лежит на горизонтальном

плоскостью равен μ . Определите: а) скорость бревна у основания наклонной плоскости; б) расстояние, пройденное бревном в горизонтальном направлении.

7.45. Однородный цилиндр массой m и радиусом r скатывается без скольжения с вершины клина массой $2m$ и высотой $h \gg r$ (рис. 7.13). Острый угол клина α , трение между

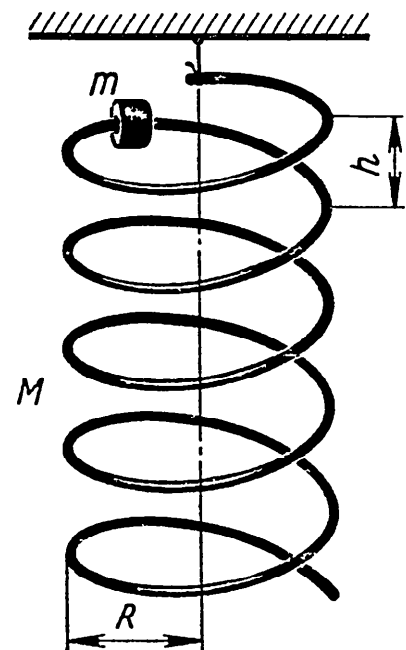


Рис. 7.14.

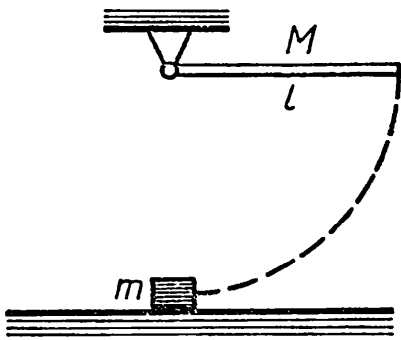


Рис. 7.15.

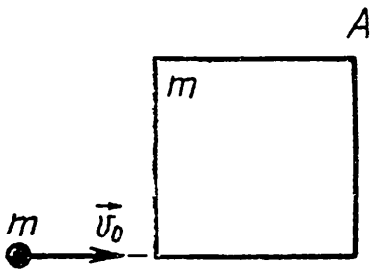


Рис. 7.16.

столе, и соударение происходит по линии центра шара. а) Какова кинетическая энергия шара после того, как его движение перейдет в чистое качение? б) Решите задачу при условии, что в момент центрального неупругого удара пуля вращалась с угловой скоростью ω . Пулю считать цилиндром радиусом $r \ll R$, проскальзыванием шара пренебречь.

7.50. Шар массой M и радиусом R лежит на столе, касаясь неупругого выступа высотой $h < R/2$. В шар по линии центра попадает горизонтально летящая пуля массой $m \ll M$ и сразу же застревает в нем. При какой минимальной скорости пули шар закатится на выступ?

7.51. Стержень длиной l и массой M отводят в горизонтальное положение и отпускают (рис. 7.15). В вертикальном положении происходит упругое соударение

стержня с телом массой m , лежащем на гладкой горизонтальной поверхности. Какова потенциальная энергия деформации тел в момент их наибольшей деформации?

7.52. Тонкая квадратная пластинка массой m лежит на гладком горизонтальном столе. В край пластинки попадает дробинка массой m и застревает в ней. Скорость дробинки в момент удара равна v_0 и направлена перпендикулярно ребру (рис. 7.16). Определите: а) скорость центра масс системы после удара; б) максимальную скорость точки A при движении пластинки; в) изменение кинетической энергии системы.

§ 8. Всемирное тяготение

8.1. Известный белый карлик — Сириус B имеет радиус, равный 0,02 радиуса Солнца, масса звезды равна массе Солнца. Чему равно ускорение свободного падения на поверхности Сириуса B и какова его плотность?

8.2. По какому закону изменяется сила тяготения, действующая на тело массой m , и потенциальная энергия тела в зависимости от его расстояния x до центра Земли? Постройте графики зависимости $F = F(x)$ и $\Pi = \Pi(x)$.

8.3. Полагая, что средняя плотность Земли $\rho = 5,6 \cdot 10^3$ кг/м³, определите давление на расстоянии $x < R_3$ от ее центра. Чему равно давление в центре Земли?

8.4. В однородном шаре плотностью ρ и радиусом R имеется сферическая полость радиусом $R/2$ (рис. 8.1). В центре полости находится шарик той же плотностью и радиусом $R/4$. Определите напряженность и потенциал гравитационного поля в центре шарика.

8.5. В однородной жидкости плотностью ρ_0 находятся два шарика радиусами r . Плотности шариков ρ_1 и ρ_2 . Найдите силу, действующую на первый шарик, если они находятся на расстоянии $R \gg r$ друг от друга. Рассмотрите случаи, когда: а) $\rho_1 = \rho_2 > \rho_0$; б) $\rho_1 = \rho_2 < \rho_0$.

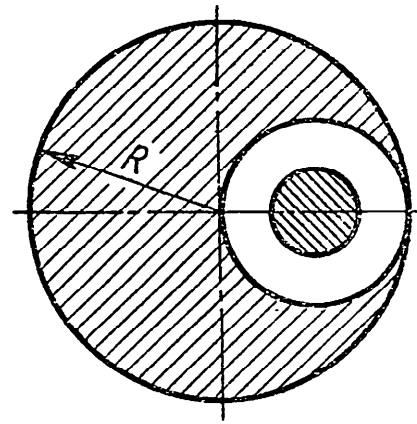


Рис. 8.1.

8.6. Два тонких однородных стержня массой m и длиной l расположены перпендикулярно друг другу так, что ближайший конец одного стержня находится на расстоянии l от середины другого. С какой силой притягиваются стержни?

8.7. В нашей Галактике насчитывается примерно $1,6 \cdot 10^{11}$ звезд. Пренебрегая гравитационной энергией отдельных звезд и считая, что масса каждой звезды равна массе Солнца, а среднее расстояние между любыми двумя звездами порядка 10^{21} м, сравните величину гравитационной энергии Галактики с гравитационной энергией Солнца.

8.8. Определите расстояние от центра Земли до искусственного спутника и скорость его относительно поверхности Земли, если спутник запущен так, что он движется в плоскости земного экватора и с Земли все время кажется неподвижным.

8.9. Расстояние от Земли до Луны равно $3,85 \cdot 10^5$ км, время обращения Луны вокруг Земли 27,32 сут. Зная, что спутник Сатурна—Диона находится от него на расстоянии $3,77 \cdot 10^5$ км и период обращения этого спутника вокруг Сатурна $T_2 = 2,74$ сут, определите, во сколько раз масса Сатурна больше массы Земли.

8.10. Общая масса двойной звезды равна удвоенной массе Солнца, период обращения компонентов звезды вокруг центра масс равен продолжительности земного года. Чему равно расстояние между компонентами этой звезды?

8.11. Спутник массой m движется по эллиптической орбите вокруг Земли так, что его перигей и апогей, отсчитываемые от центра Земли, равны соответственно h и H . Определите: а) полную механическую энергию спутника; б) скорость спутника в тот момент, когда он находится на расстоянии r от центра Земли; в) период обращения спутника. г) Вычислите массу Земли, используя параметры орбиты искусственного спутника «Космос-380»: $T = 102,2$ мин, $h = 6588$ км, $H = 7926$ км.

8.12. Расстояние от Луны до центра Земли изменяется от $3,63 \cdot 10^5$ км в перигее до $4,05 \cdot 10^5$ км в апогее. Период обращения Луны вокруг Земли 27,32 сут. Искусственный спутник Земли движется по орбите так, что его расстояние в перигее равно 225 км, а в апогее 710 км. Полагая средний радиус Земли равным 6378 км, определите период обращения спутника.

8.13. Искусственный спутник Земли движется по круговой орбите радиусом R . Период обращения спутника T_1 . Во сколько раз

нужно увеличить скорость спутника, включив на короткое время двигатель, чтобы перевести его на эллиптическую орбиту с периодом обращения T_2 ? Каково будет при этом расстояние от спутника до центра Земли в апогее?

8.14. На сколько нужно было изменить скорость космического корабля «Аполлон-8», чтобы перевести корабль с эллиптической орбиты с максимальным удалением от поверхности Луны $H = 312$ км и минимальным $h = 112$ км на круговую орбиту с высотой полета над поверхностью Луны h ? При решении считать, что двигатель был включен на короткое время, когда корабль находился от Луны на минимальном расстоянии.

8.15. Планета Плутон имеет орбиту с большой полуосью $a = 40$ а. е. и эксцентриситетом $e = 0,25$. Найдите период обращения и максимальную скорость планеты.

8.16. Какая энергия выделилась бы при лобовом неупругом столкновении с Землей метеорита диаметром 10^3 м и плотностью $5 \cdot 10$ кг/м³? Перед столкновением метеорит двигался по орбите, на которой его механическая энергия близка к нулю. Выразите результат в мегатоннах тринитротолуола ($1 \text{ Мт} = 4 \cdot 10^{15}$ Дж).

8.17. Ракета запущена вертикально вверх с поверхности Земли с первой космической скоростью. а) На какое расстояние удалится ракета от Земли? б) Через сколько времени ракета упадет на Землю? в) На каком расстоянии от точки старта упадет ракета, если она будет запущена под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту? Сопротивление воздуха не учитывать, годовым и суточным вращением Земли пренебречь.

8.18. Какую минимальную энергию нужно сообщить спутнику массой m , чтобы он смог достичь поверхности Луны? Какова скорость спутника в момент посадки на поверхность Луны? При расчете считать, что в процессе движения спутника взаимное положение Земли и Луны меняется незначительно, сопротивление атмосферы не учитывать.

8.19. С какой скоростью космический корабль подходит к Марсу при запуске его с Земли по энергетической минимальной орбите? Орбиты Земли и Марса считать круговыми.

§ 9. Упругие деформации

9.1. На какую глубину можно опустить в океан стальной трос, чтобы он не разорвался под действием силы тяжести? Изменением плотности воды с глубиной пренебречь, допустимое напряжение для стали 10^9 Н/м².

9.2. На пружину подвесили груз массой m , в результате чего она удлинилась на Δl_0 . Затем к середине растянутой пружины подвесили еще один груз такой же массы. Определите абсолютное удлинение пружины и энергию деформации. Сравните полученный результат с тем, который получится, если бы оба груза подвесить к концу пружины.

9.3. Однородный стержень плотностью ρ вращается в горизонтальной плоскости с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов. Длина стержня l . По какому закону меняется напряжение вдоль стержня? Чему равна плотность энергии деформации?

9.4. Медное кольцо, изготовленное из тонкой ленты длиной 1 м, вращается вокруг оси, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости. При каком числе оборотов кольцо разорвется?

Какой максимальной кинетической энергией может обладать кольцо при вращении, если площадь поперечного сечения ленты 10^{-4} м²?

9.5. До какого давления можно накачать сферический баллон диаметром $1,82$ м, имеющий толщину стенок $0,01$ м, чтобы он имел двукратный запас прочности? Атмосферное давление нормальное, допустимое напряжение материала баллона $3 \cdot 10^5$ Н/м².

9.6. Размеры подвеса, состоящего из двух стержней с площадью поперечного сечения S , показаны на рисунке 9.1. Допустимое напряжение материала равно σ , модуль Юнга E . а) Какой груз может выдержать подвес? б) Каково при этом смещение точки A , вызванное деформацией стержней?

9.7. На гладкой наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол α , находится брусок массой m , сечением S и длиной l (рис. 9.2). Одним концом брусок упирается в выступ, на другой конец действует сила $F = mg$, равномерно распределенная по сечению бруска. На сколько изменится длина бруска, если убрать выступ?

9.8. Стальной конус высотой H стоит на горизонтальном столе. Определите величину сжатия конуса под действием силы тяжести. Плотность стали ρ и модуль Юнга E считать известными.

9.9. К стальной проволоке длиной l и диаметром d подвешен груз массой m . Модуль Юнга для стали E , коэффициент Пуассона μ . Определите: а) абсолютное и относительное изменение площади поверхности и объема проволоки; б) количество теплоты, выделяющееся при деформации проволоки.

9.10. Стальной конус высотой H стоит на горизонтальном столе. Определите энергию деформации конуса, если радиус основания R .

Плотность стали ρ и модуль Юнга E считать известными.

9.11. Какой потенциальной энергией деформации обладает в океане 1 м³ воды на глубине 10^4 м? Модуль объемного сжатия воды $1,96 \cdot 10^9$ Н/м².

9.12. Тонкий диск массой m падает с высоты l на небольшой

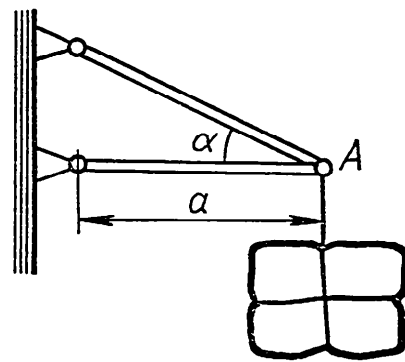


Рис. 9.1.

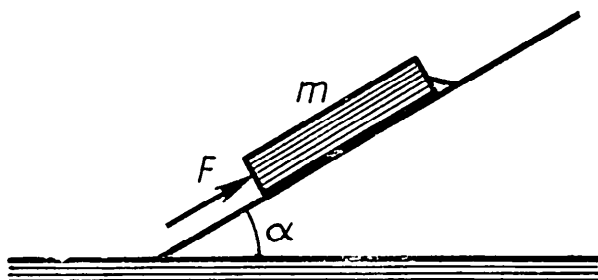


Рис. 9.2.

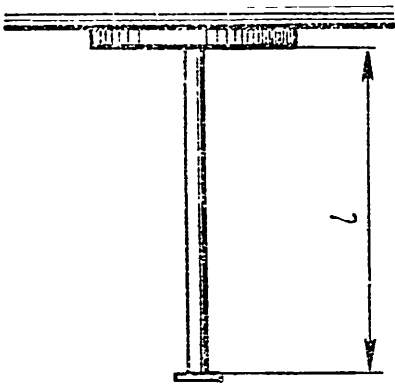


Рис. 9.3.

выступ и вызывает растяжение легкого стержня (рис. 9.3). Сечение стержня S , длина l , модуль Юнга E . Определите максимальное удлинение стержня и возникающую нагрузку. Удар считать абсолютно упругим.

9.13. Упругий резиновый шнур с грузом массой m на конце может совершать колебания в вертикальной плоскости. Шнур отводят в горизонтальное положение и отпускают. Пренебрегая массой шнура, определите скорость груза в нижнем положении.

Радиальной скоростью груза пренебречь, коэффициент упругости шнура $k = mg/l_0$, где l_0 — начальная длина шнура.

9.14. Упругий стержень массой m и длиной l закреплен одним концом в горизонтальном положении. Стержень под влиянием силы тяжести прогибается, и стрела прогиба оказывается равной δ . Определите модуль Юнга материала стержня, если момент инерции сечения I .

9.15. Круглый стальной стержень длиной l и сечением S положили концами на две опоры. Определите прогиб стержня, если в середине к нему подвесили груз массой m .

9.16. К трубе длиной 2 м, внешний и внутренний радиусы которой 5,5 и 5,0 см, с двух концов приложены два одинаковых вращающих момента $5 \cdot 10^4$ Н·м, направленных по оси трубы. Модуль сдвига материала $8 \cdot 10^{10}$ Н/м². Определите максимальный угол закручивания сечения трубы и потенциальную энергию деформации.

9.17. Из проволоки сделали пружину радиусом R . Витки пружины плотно прилегают друг к другу. Чему равен коэффициент упругости пружины, если для закручивания проволоки на угол α нужно приложить вдоль ее оси момент M . Упругие свойства проволоки считать неизменными.

§ 10. Колебания и волны

10.1. Небольшой грузик совершает колебания по закону $x = 2 \sin \pi (t + 0,5)$ (x в сантиметрах). Определите: а) период, начальную фазу колебаний, максимальные скорость и ускорение груза; б) промежутки времени от начала отсчета движения, через которые грузик будет проходить положение равновесия. Установите закон изменения скорости и ускорения грузика в зависимости от его смещения.

10.2. Точка, совершающая гармонические колебания, в некоторый момент времени имеет смещение $4 \cdot 10^{-2}$ м, скорость 0,05 м/с и ускорение 0,8 м/с². Определите: а) амплитуду и период колебаний точки; б) фазу колебаний в рассматриваемый момент времени; в) максимальные скорость и ускорение точки; г) время прохождения пути,

равного половине амплитуды колебаний при движении из положения равновесия (из крайней точки).

10.3. Шарик массой $0,010$ кг совершает гармонические колебания с амплитудой $0,03$ м и частотой 10^1 /с. Начальная фаза колебаний равна нулю. Получите закон изменения силы, действующей на шарик. Определите: а) полную энергию шарика; б) значение действующей силы и отношение потенциальной энергии к кинетической для момента времени, когда шарик удален от положения равновесия на $0,02$ м.

10.4. Точка совершает колебания, описываемые уравнением $x = 5 \sin 2t$ (x в метрах). В некоторый момент времени сила, действующая на точку, и ее потенциальная энергия соответственно равны $5 \cdot 10^{-3}$ Н и 10^{-4} Дж. Чему равна фаза колебаний и кинетическая энергия точки в этот момент времени?

10.5. Автомобиль массой 1500 кг при движении по ребристой дороге совершает гармонические колебания в вертикальном направлении с периодом $0,5$ с и амплитудой $0,15$ м. Определите максимальную силу давления, действующую на каждую из четырех рессор автомобиля.

10.6. Два цилиндрических шкива одинакового радиуса вращаются в противоположные стороны. Расстояние между осями шкивов $0,15$ м. На шкивы положили однородный стержень так, что его центр тяжести оказался смещенным к одному из шкивов и он стал совершать гармонические колебания с частотой 1^1 /с. Каково минимальное значение коэффициента трения между стержнем и шкивами? Чему равна амплитуда колебаний стержня?

10.7. На горизонтальную упругую пластинку, закрепленную на одном конце, насыпаны песчинки. Свободный конец пластинки оттягивают вниз и отпускают, после чего она начинает совершать гармонические колебания с частотой ν . Определите амплитуды колебаний A_1 и A_2 пластинки в том месте, где песчинки: а) подсакакивают на высоту H по отношению к их равновесному положению; б) не подсакакивают.

10.8. На гладком горизонтальном столе между двумя одинаково закрепленными растянутыми пружинами находится небольшой шарик (рис. 10.1). Длина пружин в свободном состоянии $l_0 < l$. Шарик смещают немного от положения равновесия, и он начинает совершать гармонические колебания — один раз вдоль оси OX , второй — вдоль оси OY . Чему равно отношение периодов колебаний вдоль этих осей?

10.9. На чашку, подвешенную на пружине с коэффициентом упругости k , с высоты h падает груз массой m . Считая удар неупругим и пренебрегая массой пружины и чашки, определите: а) период T_0 и амплитуду A колебаний системы; б) во сколько раз изменится пе-

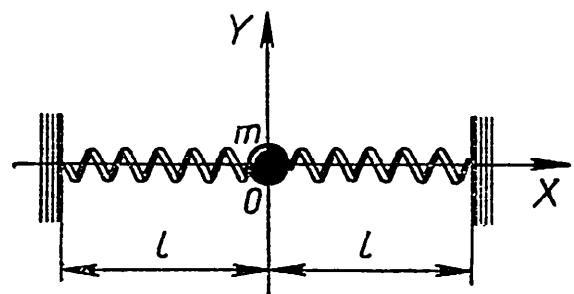


Рис. 10.1.

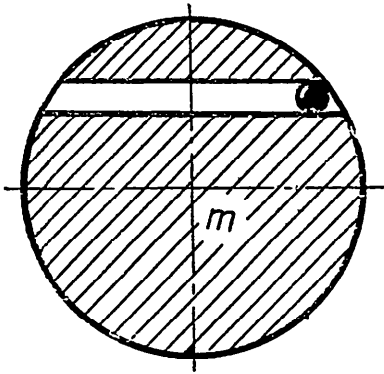


Рис. 10.2.

риод колебаний, если на расстоянии $x < A$ от положения равновесия системы подставить идеально упругую массивную плиту; в) период колебаний системы при условии, что масса пружины равна m .

10.10. Покажите, что тело, попавшее в отверстие, пронизывающее однородный шар, под действием гравитационных сил совершило бы гармонические колебания. Вычислите период этих колебаний, если радиус и масса шара равны соответственно r и m (рис. 10.2).

10.11. Математический маятник совершает колебания с амплитудой A . Спустя время t после начала движения из положения равновесия смещение маятника оказалось равным $x = 0,5 A$. Определите: а) длину маятника; б) максимальные скорость и ускорение груза.

10.12. Самое высокое место, обжитое человеком на Земле, находится на высоте 5200 м над уровнем моря (Ренбургский монастырь в Гималаях). На сколько будут спешить за сутки маятниковые часы, выверенные на этой высоте, если их перенести на уровень моря?

10.13. В космическом корабле установлены маятниковые часы. Корабль без начальной скорости запускают вертикально вверх, и он поднимается с ускорением $0,5g$. Достигнув высоты H , корабль начинает двигаться замедленно с тем же по величине ускорением. На какой высоте маятниковые часы будут показывать точное время? Изменением g с высотой пренебречь.

10.14. Два шарика массами m и $2m$ соединены между собой пружиной с коэффициентом упругости k . Шарик лежат на идеально гладком горизонтальном столе. а) К шарикам прикладывают две силы, каждая из которых $F = mg$, и сжимают пружину, затем систему быстро предоставляют самой себе. Как будут двигаться шарик? б) В меньший шарик попадает пуля массой m , летящая вдоль линии центра шаров со скоростью v . Считая удар неупругим, определите период и амплитуду колебаний шаров.

10.15. Груз массой m лежит на гладкой платформе массой M . Груз прикреплен к платформе посредством двух пружин с коэффициентами упругости k_1 и k_2 , как указано на рисунке 10.3. В положении равновесия, совпадающего с серединой платформы, обе пружины недеформированы. Удерживая платформу, груз отводят от положения равновесия на расстояние x_0 и затем всю систему предоставляют самой себе. Пренебрегая трением между столом и платформой, определите период колебаний груза и платформы и составьте уравнение их движения.

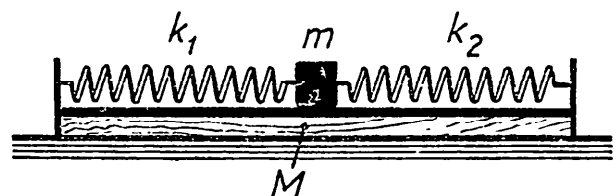


Рис. 10.3.

10.16. Маятник состоит из легкого стержня длиной $2l$, на концах которого находятся два небольших шарика массами m и $2m$. Стержень может свободно качаться в вертикальной плоскости около оси, проходящей через его середину. Определите период малых колебаний такого маятника.

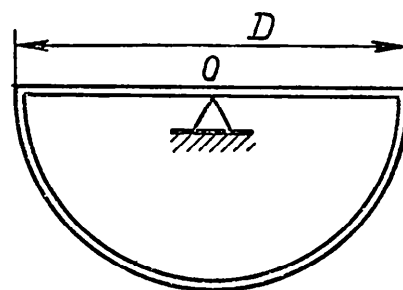


Рис. 10.4.

10.17. Каркас, изготовленный из однородной проволоки, состоит из дуги полуокружности и диаметра D (рис. 10.4). Каркас, подвешенный в точке O , совершает свободные колебания в вертикальной плоскости. Сколько полных колебаний сделает такой контур за время t ?

10.18. Однородный стержень подвешен за концы на двух одинаковых пружинах. Один раз стержень отводят вниз на небольшое расстояние и предоставляют систему самой себе, другой раз поворачивают относительно неподвижного центра инерции и отпускают. В обоих случаях стержень совершает малые колебания в вертикальной плоскости. Чему равно отношение частот этих колебаний?

10.19. Стержень массой m и длиной l прикреплен концом к двум пружинам с коэффициентом упругости k и может совершать малые колебания (рис. 10.5, а и б). Чему равно отношение периодов колебаний маятника в указанных случаях?

10.20. Однородная пластинка, имеющая форму равнобедренного треугольника со сторонами l и $2l$, может колебаться около горизонтальной оси. а) Чему равен период малых колебаний пластинки, если ось проходит через вершину меньшего угла? б) На каком расстоянии от центра масс должна проходить ось, чтобы период колебаний пластинки был наименьшим?

10.21. Шар радиусом R сделан наполовину из свинца, наполовину из алюминия. Шар лежит на горизонтальном столе. Какова

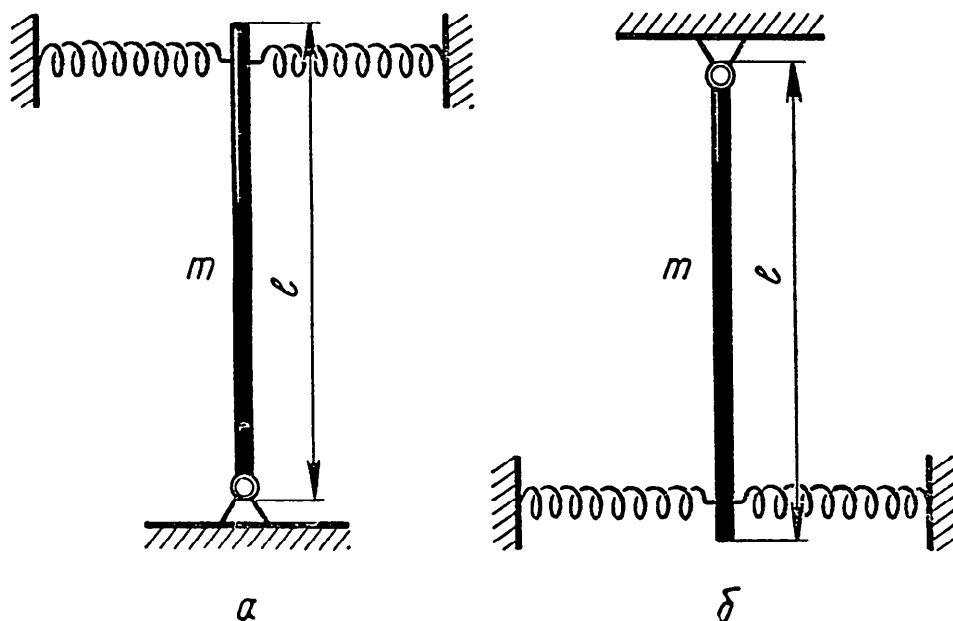


Рис. 10.5.

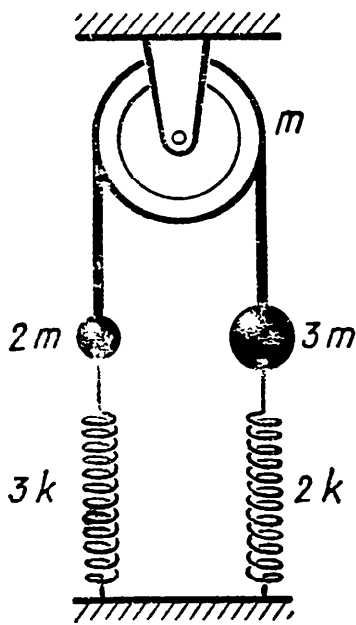


Рис. 10.6.

круговая частота малых колебаний шара, если его немного отклонить от положения равновесия и затем отпустить?

10.22. Упругий стержень длиной l опирается концами на две гладкие опоры. Момент инерции сечения стержня равен I , модуль упругости материала E . Посередине стержня положили груз массой m , который стал совершать малые колебания в вертикальной плоскости. а) Пренебрегая массой стержня, определите период этих колебаний. б) Решите задачу при условии, что масса стержня равна $8m$.

10.23. Через неподвижный блок, представляющий собой цилиндр массой m , перекинута легкая лента, на концах которой находятся два шара с массами $2m$ и $3m$. Посредством пружин с коэффициентами жесткости $3k$ и $2k$

шары прикреплены к горизонтальной опоре, и вся система находится в равновесии (рис. 10.6). Определите круговую частоту малых колебаний системы, которые возникнут, если меньший шар немного оттянуть вниз и затем отпустить. Проскальзыванием ленты и трением на оси блока пренебречь.

10.24. Шарик массой m и радиусом r катается без скольжения по внутренней поверхности цилиндра радиусом R , совершая малые колебания около положения равновесия. Сколько раз за время $t \gg T$ шарик побывает в положении равновесия?

10.25. Определите период крутильных колебаний диска, насаженного на тонкий составной стержень, указанный на рисунке 10.7, а. Если взять один стержень, то его период крутильных колебаний вместе с диском равен T_1 , если взять другой, то период — T_2 . Чему равен период малых крутильных колебаний, если диск закрепить между стержнями (рис. 10.7, б)?

10.26. Однородная квадратная плита подвешена за углы на четырех параллельных нитях длиной l . Плиту повернули на малый угол вокруг вертикальной оси, и она стала совершать малые крутильные колебания. Чему равен период этих колебаний?

10.27. Простой гирокомпас представляет собой гироскоп, плавающий в ртути. Угловая скорость собственного вращения гироскопа Ω , момент инерции относительно оси симметрии I_0 , относительно поперечной оси I_1 . Найдите направление колебаний и период малых колебаний оси гироскопа на экваторе.

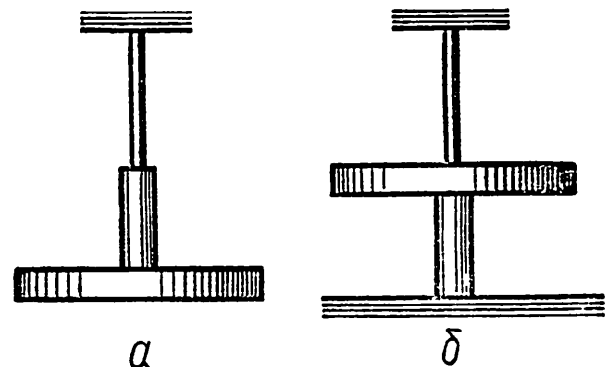


Рис. 10.7.

10.28. Амплитуда затухающих колебаний математического маятника за время t_1 уменьшается в k раз. Длина маятника l . а) Чему равен логарифмический декремент затухания δ ? б) За какое время t_2 , считываемое после начала наблюдений, амплитуда уменьшится еще в k раз? в) Сколько полных колебаний сделает при этом маятник? г) Через сколько времени энергия маятника уменьшится в k раз?

10.29. Два маятника представляют собой медный и алюминиевый шары одинакового диаметра. Оба маятника начинают колебания с одинаковой амплитудой. Сила сопротивления, действующая на шары, пропорциональна их скорости, мгновенная скорость потерь энергии пропорциональна квадрату скорости. Спустя некоторое время после начала колебаний амплитуда алюминиевого маятника уменьшилась вдвое. Во сколько раз уменьшилась при этом амплитуда медного маятника?

10.30. После 10 полных колебаний точки ее амплитуда колебаний уменьшается от 10 до 6 см. Коэффициент затухания равен 0,2. Получите закон движения точки.

10.31. Однородный шар массой m и радиусом r подвешен к тонкой упругой проволоке и совершает затухающие крутильные колебания. Полагая, что вначале шару была сообщена угловая скорость ω_0 , восстанавливающий момент пропорционален углу закручивания проволоки $M_1 = c_1\varphi$, а момент сил сопротивления пропорционален угловой скорости вращения шара $M_2 = c_2\dot{\varphi}$, составьте уравнение движения шара.

10.32. Стальной шарик диаметром $d = 2$ см совершает на легкой пружине вертикальные колебания с циклической частотой $\omega_0 = 5$ 1/с и амплитудой $A = 5$ см. Если колеблющийся шарик опустить в жидкость, циклическая частота колебаний становится $\omega_1 = 4$ 1/с. а) Определите коэффициент вязкости жидкости. б) Составьте уравнение движения шарика в жидкости.

10.33. На горизонтальном столе лежит брусок массой M , прикрепленный к свободному концу пружины с коэффициентом упругости k . В брусок попадает пуля массой $m \ll M$, имеющая в момент удара скорость v , направленную вдоль оси пружины. Коэффициент трения между бруском и столом равен f . Считая удар абсолютно неупругим и пренебрегая массой пружины, найдите: а) период колебаний бруска; б) амплитуду i -го колебания; в) путь, пройденный бруском до остановки.

10.34. При частотах вынуждающей силы, равной ν и $\frac{3}{2}\nu$, амплитуды смещения колеблющейся точки оказались равны между собой. а) При какой частоте вынуждающей силы амплитуда смещения точки достигнет максимального значения? б) Решите задачу при условии, что при данных частотах равны амплитуды скоростей и найдите резонансную частоту для скорости колеблющейся точки. Амплитуда вынуждающей силы в обоих случаях одна и та же.

10.35. Маятник, состоящий из легкой нити длиной $l = 1,0$ м с грузом массой $m = 0,1$ кг на конце, совершает колебания под воз-

действием вынуждающей силы, амплитудное значение которой $F_0 = 10^{-2}$ Н, и силы сопротивления, пропорциональной скорости $\vec{F} = -0,14 \vec{v}$ (F в ньютонах). а) При каких циклических частотах вынуждающей силы наблюдается резонанс смещения и скорости? б) Составьте уравнения смещения и скорости груза при их резонансных частотах. в) Определите добротность системы.

10.36. На тело массой $m = 10^{-2}$ кг, совершающее колебания по закону $x = 0,1 \exp(-6t) \cos 10,5 \pi t$ (x в метрах), в некоторый момент времени начала действовать внешняя периодическая сила F , в результате чего колебания стали гармоническими с амплитудой $A = 5 \cdot 10^{-2}$ м и циклической частотой $\omega = 10,0 \pi$ 1/с. Получите закон изменения F с течением времени. Найдите: а) сдвиг фаз φ между силой и смещением; б) период собственных колебаний; в) время установления колебаний.

10.37. Грузик, подвешенный на легкой пружине, совершает гармонические колебания в вертикальной плоскости с амплитудой A_1 . В некоторый момент времени точка подвеса сама начинает колебаться в вертикальной плоскости с амплитудой A_2 и тем же периодом, причем по фазе это колебание оказалось сдвинутым от колебаний грузика на φ . а) Какова амплитуда A результирующего колебания? б) Каково значение разности фаз складываемых колебаний, когда амплитуда результирующего колебания равна A_1 ? в) Определите период результирующего колебания, если частоты складываемых колебаний близки по значению друг к другу и равны ν_1 и ν_2 .

10.38. Точка участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, описываемых в единицах СИ уравнениями $x = 2 \cos \omega t$ и $y = 3 \sin 0,5 \omega t$. а) Постройте траекторию движения точки и укажите направление ее движения. б) Найдите максимальные скорость и ускорение точки.

10.39. Плоская волна распространяется в среде с плотностью ρ . Уравнение волны имеет вид $y = A \sin(\omega t - kx)$. а) Как изменяется давление в среде в направлении распространения волны в зависимости от координаты x и времени t ? б) Чему равна интенсивность волны?

10.40. Амплитудные значения смещения и скорости плоской акустической волны в воде равны соответственно $\xi_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ м и $v_0 = 1,38$ м/с. а) Составьте уравнения волн смещения, скорости и давления. б) Найдите смещение и скорость точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии $x = \lambda/6$ по истечении времени $T/4$ после начала колебаний.

10.41. Один конец упругого стержня жестко закреплен, на другом его конце возбуждают колебания, происходящие по закону $y = y_0 \sin \omega t$ и распространяющиеся со скоростью v . а) Чему равна амплитуда колебаний произвольной точки стержня, отстоящей от его закрепленного конца на расстоянии x ? При отражении от закрепленного конца фаза колебаний меняется на противоположную. б) Чему равна полная механическая энергия, заключенная между

сечениями, проходящими через соседние узлы, если плотность и сечение стержня равны ρ и S ?

10.42. Если в среде, где распространяются волны, выбрать начало координат так, чтобы оно совпадало с пучностью смещения точек среды, а ось X — с направлением распространения волны, то на расстоянии x смещение точек среды описывается уравнением $\xi = 2 \cdot 10^{-3} \cos \frac{\pi x}{3} \sin 110,0 \pi t$ (ξ в метрах). а) Составьте уравнение бегущих волн. б) Определите координаты точек, в которых скорости частиц имеют экстремальные значения.

10.43. Медный стержень длиной $l = 0,5$ м закреплен в середине. Найдите частоты собственных продольных колебаний стержня.

10.44. Конец очень длинной струны под действием гармонической силы колеблется с частотой 10 Гц и амплитудой 10^{-2} м. Фазовая скорость равна 5 м/с. Составьте уравнение движения точек струны, расположенных на расстоянии 3,25 и 3,50 м. Чему равен средний поток энергии, проходящий по струне, если ее линейная плотность равна 10^{-2} кг/м, а натяжение 490 Н?

10.45. Струна имеет линейную плотность $3,7 \cdot 10^{-3}$ г/см и длину 65 см. Каким натяжением можно настроить струну на ноту «ля» (440 Гц)? Чему равна при этом скорость распространения упругих волн? При каком натяжении струны возникнут четыре пучности?

10.46. Две одинаковые струны длиной 1,5 м каждая совершают колебания с частотой $1,34 \cdot 10^3$ Гц. На какую величину нужно укоротить одну из струн, не меняя натяжения, чтобы получить биения с частотой 9,0 Гц?

10.47. Звуковая волна распространяется по узкой цилиндрической трубе длиной 10 м. Уровень интенсивности звука у начала трубы 10 дБ, у конца 9,65 дБ. Определите коэффициент поглощения звука в среде.

10.48. Смещение точек плоской акустической волны в воздухе описывается в единицах СИ уравнением $\xi = 5 \cdot 10^{-5} \sin (400 \pi t - 3,8 x)$. Скорость звука и плотность воздуха равны соответственно 330 м/с и $1,3$ кг/м³, интенсивность звука на пороге слышимости для звука данной частоты 10^{-12} Вт/м². Определите длину волны, амплитуду звукового давления и уровень интенсивности.

10.49. На расстояниях 5 м от точечного источника звука частотой 10^3 Гц уровень интенсивности звука равен 10 дБ. Пренебрегая поглощением энергии воздухом, определите: мощность источника; уровень интенсивности звука на расстоянии 2 м; расстояние, на котором звук не слышен. Амплитуда звукового давления на пороге слышимости для данной частоты $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м².

§ 11. Механика жидкостей

11.1. Тонкая пластинка массой m лежит на наклонной стенке резервуара с водой (рис. 11.1). Площадь пластинки S , коэффициент трения между стенкой и пластинкой равен f . Какую силу F нужно

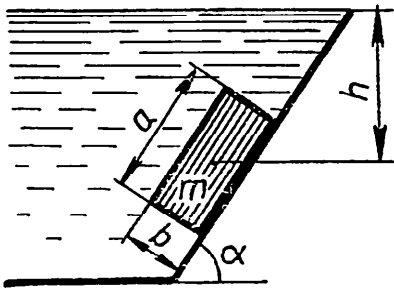


Рис. 11.1.

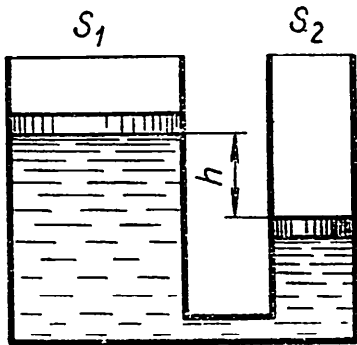


Рис. 11.2.

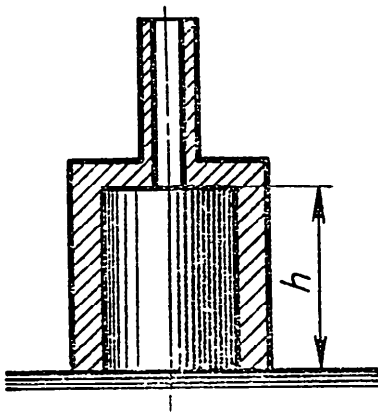


Рис. 11.3.

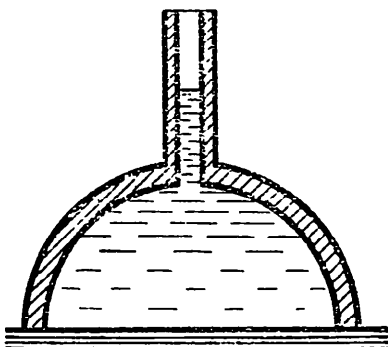


Рис. 11.4.

приложить к пластинке вдоль наклонной стенки, чтобы сдвинуть ее с места? Вода под пластинку не подтекает, атмосферное давление p_0 , необходимые размеры указаны на рисунке.

11.2. В двух сообщающихся сосудах, площади поперечного сечения которых равны S_1 и S_2 , налита вода (рис. 11.2). На поверхности воды находятся тонкие тяжелые поршни разной плотности, и поэтому разность уровней равна h . Если на больший поршень налить слой масла, поршни оказываются на одном уровне. Какова будет разность x уровней воды, если масло перелить на меньший поршень? Трением пренебречь.

11.3. Цилиндрический сосуд с трубкой надет на идеально гладкий поршень (рис. 11.3). Сечения поршня и трубки равны соответственно S и $S/2$, общая масса сосуда и трубки равна m . а) До какого уровня нужно налить воду в трубку, чтобы цилиндр перестал сверху касаться поршня? При каком условии это возможно? б) До какого уровня нужно налить воду в трубку, чтобы сосуд поднялся на высоту $h/2$? в) С какой силой вода при этом будет давить на крышку цилиндра?

11.4. Колокол, представляющий собой полусферу радиусом R , имеет массу m . В колокол впаяна тонкая легкая трубка, и он стоит на гладком горизонтальном столе (рис. 11.4). До какого уровня можно налить воду в трубку, чтобы вода не вытекала из-под колокола?

11.5. Какую работу надо совершить, чтобы сдвинуть поршень площадью S на расстояние l в трубопроводе, соединяющем два резервуара, наполненных водой до одного уровня (рис. 11.5)? Чему равен период колебания поршня, если его сдвинуть из равновесного положения на расстояние l и затем отпустить? Площади поперечного сечения резервуаров равны S_1 и S_2 . Трением и массой поршня пренебречь.

11.6. К весам подвешена барометрическая трубка массой $m = 0,20$ кг (рис. 11.6). Внутреннее сечение трубки $S = 10^{-4}$ м².

Нижний конец трубки погружен в ртуть на ничтожно малую глубину. а) Какой груз нужно положить на чашку весов, чтобы весы находились в равновесии при нормальном атмосферном давлении? б) Как изменится ответ, если вся система будет подниматься вверх с ускорением a ?

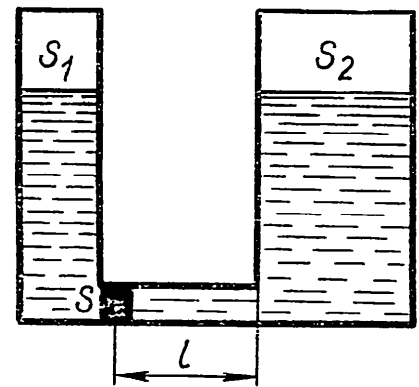


Рис. 11.5.

11.7. Призматический сосуд длиной 3 м и шириной 1 м разделен перегородкой на два отсека, наполненные водой до высот $h = 1,0$ и $H = 1,75$ м (рис. 11.7). Сосуд начинает двигаться горизонтально с ускорением $a = 0,5 g$. Определите: а) давление жидкости в точке А; б) суммарную силу давления воды на перегородку; в) ускорение, при котором эта сила станет равной нулю.

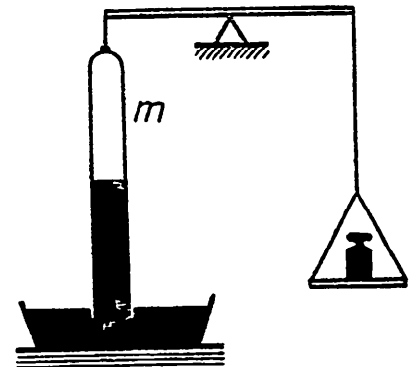


Рис. 11.6.

11.8. В тонкую трубку, имеющую вид перевернутой буквы П, до половины налита жидкость плотностью ρ . Трубка вращается с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью левого колена. Расстояние между коленами трубки равно l , высота колен $2l$. Определите разность уровней жидкости в сосудах и максимальное давление на стенки.

11.9. Цилиндрический сосуд диаметром D и высотой D до половины наполнен водой. В крышке сосуда имеется центральное отверстие диаметром $\frac{3}{4} D$. С какой угловой скоростью ω можно вращать сосуд вокруг его вертикальной оси, чтобы вода не выливалась? С какой силой вода давит при этом на крышку?

11.10. На дне сосуда, наполненного водой, лежит свинцовый груз массой 4,38 кг. К грузу на легкой нити привязали пробку, в результате чего груз перестал давить на дно сосуда. При каком минимальном значении массы пробки это возможно? Какое натяжение при этом испытывает нить?

11.11. Шаровой клапан диаметром $D = 0,15$ м и массой $m = 0,5$ кг закрывает входное отверстие трубы диаметром $d = 0,10$ м (рис. 11.8). При какой разности уровней клапан начнет пропускать воду из трубы в резервуар.

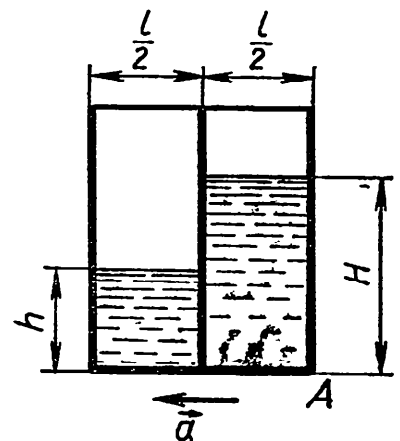


Рис. 11.7.

11.12. Вес однородного куска металла в воздухе и в воде оказался равным P_1 и P_2 . Плотности воздуха и воды при взвешивании равны ρ_1 и ρ_2 . Чему равна масса m металла и какова его плотность ρ ?

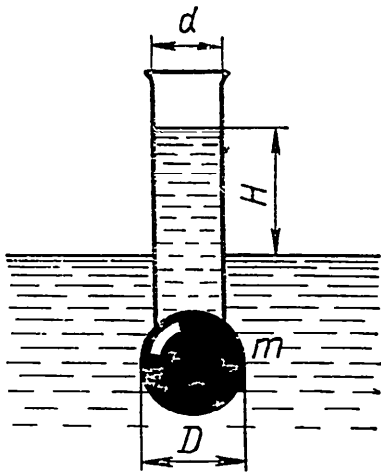


Рис. 11.8.

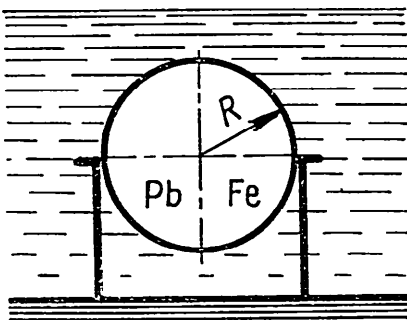


Рис. 11.9.

11.13. На границе раздела двух несмешивающихся жидкостей с плотностями ρ_1 и ρ_2 плавает полый шар объемом V , изготовленный из материала с плотностью ρ_0 . Определите объем полости в шаре, если отношение объемов частей шара, находящихся в первой и второй жидкостях, равно n .

11.14. Шар радиусом R составлен из двух половинок — железной и свинцовой. Шар опущен в воду и покоится на двух опорах, как указано на рисунке 11.9. С какой силой шар давит на опоры?

11.15. Тонкий однородный стержень длиной l , сечением S и массой m опущен в стакан, до половины наполненный водой. Размеры стакана указаны на рисунке 11.10. Чему равны силы, действующие на стакан со стороны стержня? Трением пренебречь.

11.16. Деревянный брусок длиной l подвешен на шарнире и нижним концом опущен в воду. Плотность дерева ρ_1 . Определите, при какой глубине погружения: а) вертикальное положение бруска будет устойчивым; б) брусок находится в устойчивом равновесии под углом α к горизонту.

11.17. Брусок, имеющий квадратное сечение площадью S , плавает в воде в вертикальном положении. Плотность бруска ρ . При какой высоте бруска его равновесие в воде будет устойчивым? Решите задачу при условии, что в воде плавает цилиндр с площадью поперечного сечения S .

11.18. Отверстие в плоской стенке, имеющее диаметр $d_0 = 0,20$ м, закрыто конической пробкой (рис. 11.11). Диаметры оснований пробки $d_1 = 0,30$ м и $d_2 = 0,15$ м, ее высота $l = 0,30$ м. Уровень воды $H = 0,50$ м, $\alpha = 45^\circ$. Пренебрегая массой пробки и трением, определите силу, которую нужно приложить к пробке, чтобы вынуть ее из отверстия. Проанализируйте ответ в функции угла и рассмотрите случаи: $\alpha = 0$, $\alpha = 90^\circ$.

11.19. Палочка длиной l и плотностью ρ_0 погружена в вертикальном положении в неоднородные несмешивающиеся жидкости плотностями ρ_1 и ρ_2 , причем $\rho_1 < \rho_0 < \rho_2$. Одна часть палочки находится в верхнем слое жидкости, достигающем до ее конца, другая — в нижнем. Определите: а) работу, которую нужно совершить, чтобы палочку погрузить во второй слой; б) на какую высоту поднимется конец палочки

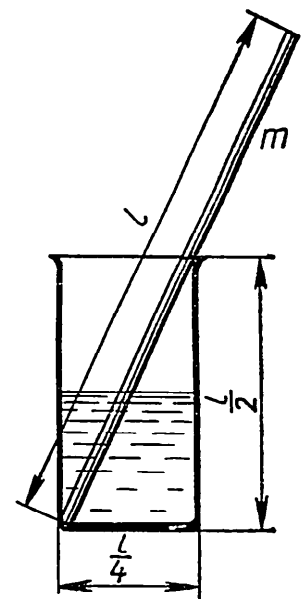


Рис. 11.10.

над границей раздела жидкостей, если палочку отпустить; в) с каким периодом будут происходить вертикальные колебания палочки.

11.20. По трубе диаметром $d = 20$ см, изогнутой под углом $\alpha = 120^\circ$, течет вода (рис. 11.12). Ее расход $q = 100$ л/с. Чему равна равнодействующая сил давления, действующих на стенку трубы?

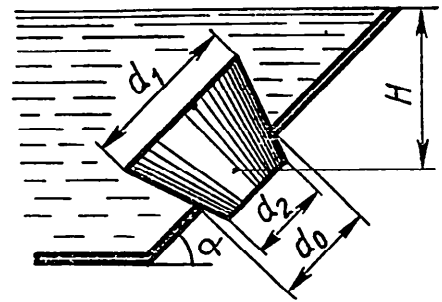


Рис. 11.11.

11.21. Масса вертолета $3 \cdot 10^3$ кг, мощность мотора 325 кВт, диаметр винта, отбрасывающего вниз цилиндрическую струю воздуха того же диаметра, равен 8 м. За какое время вертолет поднимется на высоту 100 м? Принять плотность воздуха $1,3$ кг/м³, движение равноускоренным. Сопротивлением воздуха пренебречь.

11.22. В бак равномерно поступает вода, скорость наполнения которого q . На дне бака имеется отверстие площадью S . Какой высоты может достичь уровень воды в баке?

11.23. Площадь поршня в шприце S_1 , площадь отверстия S_2 . Сколько времени будет вытекать жидкость из шприца, расположенного горизонтально, если на поршень давить силой F ? Ход поршня l , трением пренебречь.

11.24. Сосуд, имеющий форму куба с ребром l , до половины наполнен водой. В центре дна образовалось небольшое отверстие сечением S . Через сколько времени вода перестанет выливаться из сосуда, если сосуд: а) неподвижен; б) поднимается (опускается) с ускорением a ; в) движется в направлении нормали и боковой грани с ускорением $a = g$?

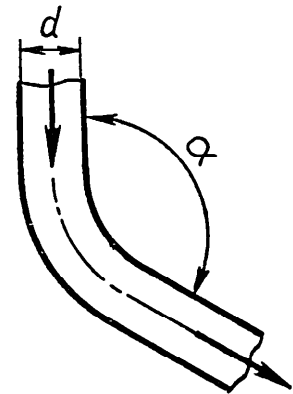


Рис 11.12.

11.25. Цилиндрический сосуд высотой h плавает в воде, погрузившись в нее до половины. Внешний и внутренний радиусы сосуда равны соответственно R и r . В некоторый момент времени на дне сосуда образовалось отверстие сечением S . Через сколько времени вода заполнит половину сосуда? Толщиной дна пренебречь.

11.26. Через полую вертикальную трубку с диском AA на конце продувается воздух (рис. 11.13). Если в воздушный поток снизу трубки внести пластинку BB массой m и площадью S , то при некотором значении средней скорости воздуха между диском и пластинкой последняя оказывается в равновесии. Определите эту скорость воздуха.

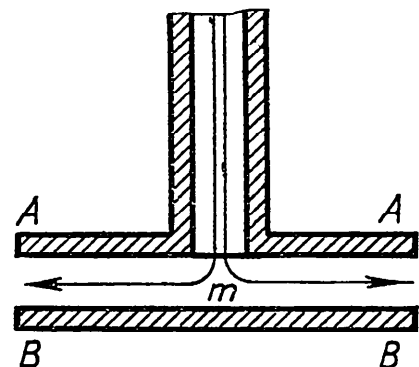


Рис. 11.13.

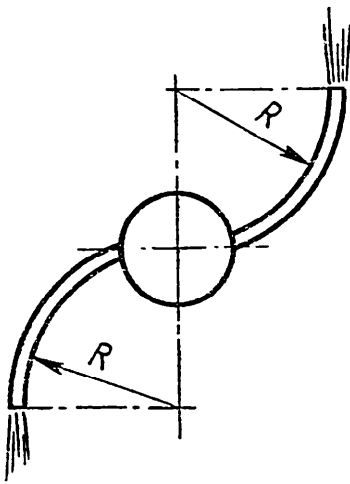


Рис. 11.14.

11.27. В широкий сосуд, в нижней части которого имеется небольшое отверстие, налита вода до высоты H_1 , а сверху нее — слой масла толщиной H_2 . Плотность воды ρ_1 , масла ρ_2 . а) С какой скоростью вода начнет вытекать из сосуда, если открыть отверстие? б) По какому закону будет изменяться уровень воды в сосуде в зависимости от времени, если площадь сечения отверстия в n раз меньше площади сечения сосуда?

11.28. Цилиндрический сосуд с водой вращается вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω . Высота столба воды в неподвижном сосуде H , радиус сосуда R . С какой устан-

новившейся скоростью будет вытекать вода из сосуда, если на дне его образуется малое отверстие: а) на оси симметрии; б) в боковой стенке у дна?

11.29. На гладком столе находится открытый цилиндрический сосуд высотой H , доверху наполненный водой. а) На какой высоте нужно сделать отверстие в стенке сосуда, чтобы струя жидкости падала на стол на максимальном расстоянии от боковой поверхности сосуда? Понижением уровня воды в сосуде пренебречь. б) Как будет меняться дальность полета струи с течением времени при понижении уровня воды? Площади сечения сосуда и отверстия равны S_1 и S_2 .

11.30. Сегнерово колесо состоит из двух радиальных трубок, изогнутых на концах по окружности радиусом $R = 4,00$ м. На трубки надеты сходящиеся насадки с диаметром выходного отверстия $d = 0,02$ м (рис. 11.14). Вытекающая в атмосферу вода поступает в трубки из неподвижного сосуда под постоянным статическим давлением $p = 2 \cdot 10^4$ Па. Пренебрегая гидравлическим сопротивлением насадок, определите момент M_0 реактивных сил струй, действующий на неподвижное колесо.

11.31. На рисунке 11.15 дана схема так называемой трубки Вентури, позволяющей определять ежесекундный расход жидкости (расходомер). Принцип действия трубки ясен из рисунка. Зная, чему равна площадь поперечного сечения S_1 широкого и S_2 узкого каналов, а также показания жидкостного манометра p , определите: а) сколько воды проходит через магистраль за время t ; б) мощность потока.

11.32. Какую максимальную мощность развивает водяная турбина, если высота напора воды равна H , сечение струи S , радиус колеса R ?

11.33. По слою жидкости толщиной $h = 5,0 \cdot 10^{-4}$ м, текущему по наклонной плоскости, скользит пластинка. Масса

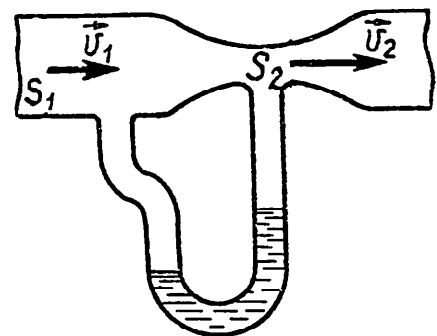


Рис. 11.15.

пластинки $m = 0,80$ кг, площадь $S = 6,4 \cdot 10^{-3}$ м², скорость установившегося движения пластинки $v_0 = 0,5$ м/с, плотность жидкости $\rho = 900$ кг/м³, угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 12^\circ$. Найдите: а) динамическую вязкость жидкости μ ; б) закон распределения скоростей в слое жидкости.

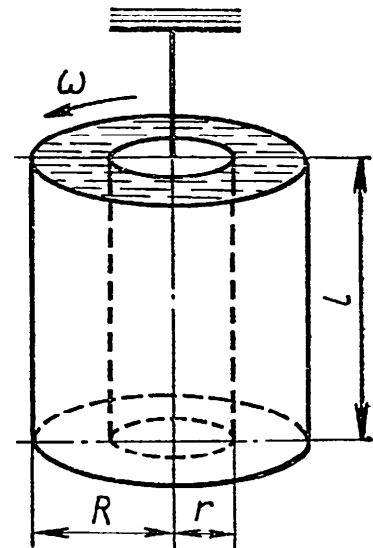


Рис. 11.16.

11.34. Один из методов измерения коэффициента вязкости жидкостей состоит в следующем. Два коаксиальных цилиндра с радиусами R и r опускаются в исследуемую жидкость (рис. 11.16). Внутренний цилиндр подвешивается на упругой нити с модулем кручения f , внешний приводится во вращение с угловой скоростью ω . Зная длину цилиндров l и угол закручивания нити φ , выведите формулу для определения коэффициента вязкости. Краевыми эффектами пренебречь.

11.35. Воздушный пузырек поднимается равномерно со дна водоема глубиной $h_0 = 1$ м. При всплытии объем пузырька меняется с глубиной по закону $V = V_0 + kh$. Определите время подъема пузырька на поверхность воды, если $k = \frac{\pi}{6} \cdot 10^{-9}$ (м²), а диаметр пузырька у поверхности воды $d = 2$ мм.

11.36. Тонкая пластинка площадью S и массой m подвешена на пружине с коэффициентом упругости k . Период малых колебаний системы в жидкости равен T . Определите коэффициент вязкости жидкости η , если известно, что сила трения между пластинкой и жидкостью $F_{\text{тр}} = 2S\eta v$, где v — скорость пластинки относительно жидкости.

11.37. Сколько воды может ежесекундно протекать через водопроводную трубу с внутренним диаметром $d = 3 \cdot 10^{-2}$ м при ламинарном течении, если $Re_{\text{кр}} = 2300$.

11.38. Свинцовый шарик диаметром $1,73 \cdot 10^{-2}$ м падает равномерно в глицерине. Определите число Рейнольдса. Является ли движение слоев глицерина при движении шарика ламинарным?

11.39. Какое избыточное давление должен создавать насос пожарной машины, чтобы подавать из брандспойта воду на расстояние $L = 50$ м, если сечения брандспойта и рукава равны $S_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ м² и $S_2 = 6,28 \cdot 10^{-3}$ м², длина рукава $l = 10$ м.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

§ 12. Тепловое расширение тел

12.1. Найдите удлинение стержня длиной l при нагревании его от T_0 до T , если известно, что в этом интервале температур коэффициент линейного расширения материала стержня меняется по закону $\alpha = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2$, где a и b — постоянные величины.

12.2. Толщина биметаллической пластинки, составленной из одинаковых полосок стали и цинка, равна 10^{-4} м. Определите средний радиус кривизны пластинки при повышении температуры на 10 К от температуры, при которой пластинка была ровной.

12.3. Часы снабжены латунным маятником. Сравнивая показания этих часов с показанием точных часов, заметили, что при $T_1 = 273$ К они спешат на $\Delta t_1 = 7$ с в сутки, а при температуре $T_2 = 293$ К отстают на $\Delta t_2 = 9$ с в сутки. Определите коэффициент линейного расширения латуни, а также температуру, при которой маятниковые часы будут идти правильно.

12.4. Определите объем шарика ртутного термометра, если известно, что при температуре 0° С ртуть заполняет только шарик, а объем канала между 0 и 100° С равен 3 мм³.

12.5. Барометр имеет латунную шкалу. При температуре 300 К высота ртутного столба, отсчитанная по шкале, равна 751,3 мм. Определите высоту столба при температуре 273 К и прежнем давлении.

12.6. В два сообщающихся сосуда наливают исследуемую жидкость. При одинаковой температуре жидкость в сосудах находится на одном уровне. Если один из сосудов охлаждать тающим льдом, а другой нагревать в парах воды, кипящей при нормальном атмосферном давлении, то при равновесии жидкости разность уровней оказывается равной h . Определите по этим данным коэффициент объемного расширения жидкости.

12.7. При укладке трамвайных рельсов их сваривают в стыках. Какие напряжения возникают в рельсах при колебаниях температуры от 303 до 243 К, если их укладывали при температуре 283 К?

12.8. Стальной стержень, состоящий из двух частей одинаковой длины l , установлен между фундаментом и упором. Сечения стержней S и $2S$. Какой зазор нужно оставить между верхним кон-

цом стержня и упором, чтобы при увеличении температуры на ΔT напряжение в стержне не превышало σ ?

12.9. Латунное кольцо сечением $2 \times 5 \text{ мм}^2$ и диаметром в несколько сантиметров было нагрето до температуры 573 К и плотно надето на стальной цилиндр, имеющий температуру 291 К. Какое усилие на разрыв будет испытывать кольцо после охлаждения до температуры цилиндра? Температуру цилиндра считать постоянной.

12.10. Стальной брусок плавает в сосуде со ртутью в вертикальном положении. При температуре 273 К в ртуть погружена 0,577 часть объема бруска. На сколько изменится погруженная часть объема бруска, если систему нагреть до температуры 373 К? Расширением сосуда пренебречь.

12.11. Алюминиевый шарик массой $m = 0,50 \text{ кг}$ опущен на нити в керосин. На сколько изменится натяжение нити, если всю систему нагреть от 273 до 323 К?

§ 13. Законы идеальных газов

13.1. Стекло́нная трубка, запаянная с одного конца, расположена горизонтально. В трубке находится воздух, отделенный от атмосферы столбиком ртути длиной l . Длина трубки $2l$, длина столбика воздуха $l/2$, атмосферное давление p_0 . На какое расстояние сместится ртуть в трубке, если: а) трубку поставить вертикально открытым концом вверх (вниз)? б) Горизонтально расположенную трубку вращать вокруг вертикальной оси, проходящей через открытый (закрытый) конец с угловой скоростью $\omega = \sqrt{g/l}$?

13.2. В ртутный манометр попал пузырек воздуха, занимающий при наружном давлении p_1 объем V_1 . Какую поправку Δp нужно вводить при измерении давления этим манометром, если разность уровней ртути в коленах манометра при атмосферном давлении p_1 равна h_1 , а при измеряемом h_2 . Поперечное сечение колен S . Разберите два случая: когда уровень ртути в запаянном колене выше, чем в открытом, и когда ниже.

13.3. В U-образную барометрическую трубку налита ртуть. Сечение узкого (запаянного) колена $S = 10^{-4} \text{ м}^2$, сечение широкого (открытого) вдвое больше. Уровни ртути в обоих коленах одинаковы, объем воздуха в запаянном колене $V = 10^{-5} \text{ м}^3$, атмосферное давление нормальное. Сколько ртути можно налить в открытое колено?

13.4. В открытый сосуд, имеющий форму куба с ребром $l = 0,1 \text{ м}$, до половины налита вода. Сверху в сосуд опущена трубка сифона, достающая дно (рис. 13.1). Сифон приводят в действие и сразу же сосуд герметически закрывают. Атмосферное давление $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $L_0 = 1,7 \text{ м}$. Пренебрегая объемом трубки, определите, сколько

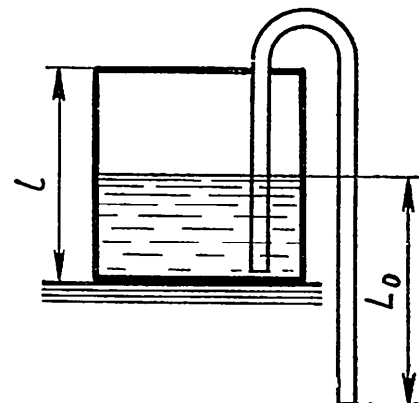


Рис. 13.1.

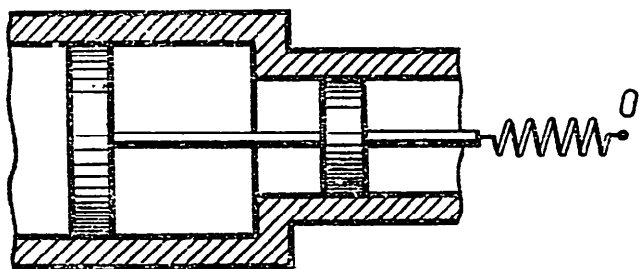


Рис. 13.2.

находится воздух. Высота стакана 1,0 м, сечение 10^{-3} м^2 , коэффициент упругости пружины 670 Н/м. При недеформированной пружине поршень находится у открытого конца стакана. Атмосферное давление нормальное, начальное давление воздуха в стакане равно атмосферному. Чему равна масса стакана?

13.6. Закрытый цилиндрический сосуд с площадью основания S и высотой H до половины залит маслом плотностью ρ_1 при атмосферном давлении. Сосуд плавает в воде так, что уровень масла совпадает с уровнем воды. Атмосферное давление p_0 . На дне сосуда образовалось небольшое отверстие. Сколько воды войдет в сосуд?

13.7. В легкой вертикальной трубке длиной l и сечением S , запаянной сверху, находится воздух, запертый столбиком ртути, доходящим до открытого конца трубки. Чтобы удержать трубку, к ней нужно приложить силу F . Каково будет ускорение a трубки с ртутью, если эту силу увеличить вдвое? Атмосферное давление нормальное, сопротивлением воздуха пренебречь.

13.8. Поршни, соединенные тонким стержнем, вставлены в цилиндры, как указано на рисунке 13.2. Площадь одного поршня больше площади другого на ΔS . Система находится при нормальных условиях, и пружина недеформирована. Если воздух между поршнями нагреть на ΔT градусов, то для восстановления положения равновесия системы конец пружины (точку O) нужно сместить вправо. Какую работу при этом придется совершить, если коэффициент жесткости пружины k ?

13.9. Закрытый с обоих концов вертикальный цилиндр разделен тяжелой теплонепроницаемой перегородкой, которая может скользить в цилиндре без трения. В обеих частях цилиндра находится одинаковое количество воздуха при температуре 400 К, причем давление воздуха под перегородкой вдвое больше, чем над ней. а) Во сколько раз изменятся объемы газа, если цилиндр перевернуть вверх дном? б) До какой температуры нужно нагреть воздух в нижней части сосуда, чтобы объемы газа стали одинаковыми?

13.10. Поршни трех одинаковых цилиндров с плечами l и $2l$ жестко связаны между собой, и объемы воздуха под ними равны (рис. 13.3). Температура воздуха в цилиндрах T_1 , давление в среднем сосуде p . Какое давление установится в цилиндрах, если средний нагреть до температуры T_2 , поддерживая в двух других тем-

воды вытечет из сосуда. Давлением паров воды пренебречь.

13.5. Тонкостенный стакан опускают в ртуть вверх дном в вертикальном положении и он погружается наполовину. В стакан вставлен легкий поршень, соединенный пружиной с дном. Под поршнем

пературу T_1 ? Во сколько раз изменится при этом объем газа в цилиндрах? Атмосферное давление p_0 , массой поршней пренебречь.

13.11. Столбик воздуха высотой $h_1 = 0,24$ м заперт в пробирке с ртутью (рис. 13.4). Длина пробирки $l = 1,00$ м. При нормальных условиях ртуть

доходит до открытого конца пробирки. Воздух нагревают до температуры T и затем охлаждают до первоначальной температуры. Уровень ртути после этого не доходит до открытого конца пробирки на $h_2 = 0,06$ м. До какой температуры нагревали воздух? До какой минимальной температуры нужно было бы нагреть воздух, чтобы вся ртуть вылилась из пробирки?

13.12. Баллон емкостью $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м³ содержит окись углерода. Ртутный манометр, подключенный к баллону, показывает давление $p_1 = 0,5 \cdot 10^5$ Па при наружном давлении $p_0 = 10^5$ Па. Температура газа в баллоне $T = 400$ К. Определите число киломолей газа в баллоне, массу газа и концентрацию молекул.

13.13. В баллоне находится азот при температуре $T_1 = 300$ К и давлении $p_1 = 1,5 \cdot 10^7$ Па. Из баллона выпустили часть газа, и при температуре $T_2 = 280$ К давление стало равным $p_2 = 0,6 \cdot 10^7$ Па. Масса баллона с газом изменилась при этом на $\Delta m = 3,2$ кг. Сколько киломолей азота содержал баллон и какова масса оставшегося газа?

13.14. В вертикальном цилиндре под сферическим поршнем радиусом $0,1$ м находится гелий массой $2 \cdot 10^{-4}$ кг при температуре 300 К. Масса поршня 12 кг, атмосферное давление 10^5 Па. С какой силой нужно надавить на поршень, чтобы он опустился до основания цилиндра?

13.15. Температура воздуха между оконными рамами меняется линейно от 263 до 293 К. Расстояние между рамами $0,25$ м, площадь окна $2,00$ м², атмосферное давление нормальное. Оцените массу воздуха между рамами.

13.16. Два резервуара объемами $5 \cdot 10^{-2}$ и $1,5 \cdot 10^{-2}$ м³, соединенные между собой короткой трубкой с клапаном, позволяющим воздуху просачиваться из большего баллона в меньший, если в первом из них давление на $1,16 \cdot 10^5$ Па больше, чем во втором. Вначале в большем баллоне находился воздух при нормальном атмосферном давлении и температуре 290 К, меньший был полностью откачан. Каково давление в баллонах при

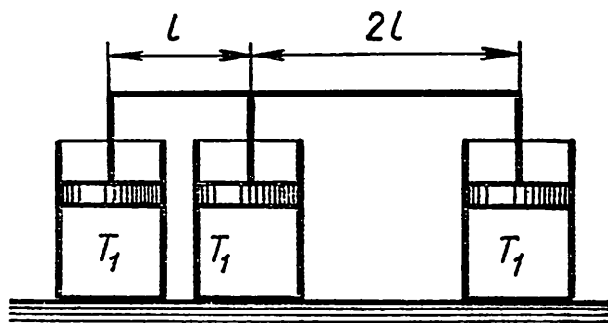


Рис. 13.3.

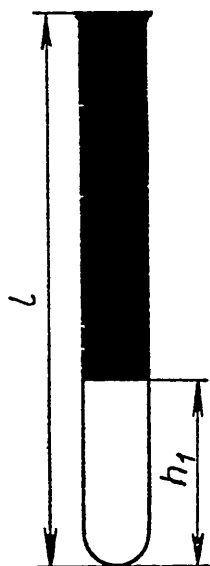


Рис. 13.4.

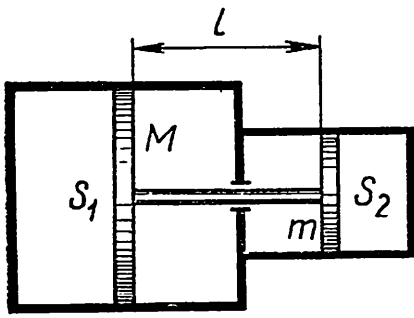


Рис. 13.5.

температуре 435 К? Сколько воздуха будет находиться при этом в меньшем баллоне?

13.17. В цилиндрах, указанных на рисунке 13.5, между поршнями находится идеальный газ. Сечение поршней S_1 и S_2 , их массы соответственно M и m . Поршни соединены жестким стержнем длиной l и находятся на одинаковом расстоянии от стыка цилиндров с различными диаметрами. При нагревании системы на ΔT градусов поршни смещаются на расстояние Δl .

а) Сколько молей газа находится между поршнями? Атмосферное давление нормальное. б) Решите задачу при условии, что цилиндры расположены вертикально.

13.18. Дымовые газы, выходящие из трубы котельной установки, имеют температуру 373 К. Высота трубы 30 м, температура окружающего воздуха 283 К, атмосферное давление 10^5 Па. Полагая массу киломоля дымовых газов равной 29 кг/кмоль, рассчитайте силу тяги в трубе. Плотность дыма и его температуру в трубе считать постоянной.

У к а з а н и е. Силой тяги называется разность статических давлений воздуха у основания трубы.

13.19. В простейшей модели атмосферы Марса предполагается, что планету окружает равноплотная атмосфера, высота которой 25 км. Температура атмосферы на планете 300 К, радиус Марса 3400 км, масса $6 \cdot 10^{23}$ кг. Какова средняя молекулярная масса атмосферного газа Марса?

13.20. Сферическая оболочка воздушного шара сделана из материала, квадратный метр которого имеет массу 1 кг. Шар наполнен гелием при нормальном атмосферном давлении, температура гелия и воздуха 273 К. При каком минимальном радиусе шара он будет подниматься?

13.21. В стальном тонкостенном сферическом баллоне массой 1 кг находится азот при температуре 300 К. Сколько азота может находиться в баллоне при пятикратном запасе прочности? Атмосферным давлением пренебречь.

13.22. Объем газа, отсасываемого форвакуумным насосом за 1 с, равен $3 \cdot 10^{-4}$ м³. По какому закону с течением времени изменяется давление в откачиваемом резервуаре объемом V_0 , если начальное давление в нем p_0 ? За какое время резервуар объемом $V_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м³ будет откачен от $p_0 = 10^5$ Па до $p_1 = 1,32 \cdot 10^{-10}$ Па?

13.23. В баллоне объемом $1,64 \cdot 10^{-3}$ м³ содержится смесь кислорода и азота общей массой 0,0120 кг. При температуре 293 К давление смеси равно $5,86 \cdot 10^5$ Па. Смесь газов пропускается через ловушку, содержащую раскаленные медные стружки, и затем перекачивается в другой баллон объемом $3,0 \cdot 10^{-2}$ м³. Каково давление во втором баллоне при температуре 360 К, если весь кислород соединится с медью?

13.24. Определите плотность ρ и концентрацию z молекул смеси, состоящей из n известных газов массой m_1, m_2, m_3, \dots . Температура и давление смеси газов равны T и p .

13.25. В баллоне объемом $0,250 \text{ м}^3$ находится один моль углекислого газа и водяной пар массой $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$. Температура газа 327 К . Вычислите молекулярную массу смеси, давление и среднее расстояние между молекулами газа.

13.26. При комнатной температуре четырехокись азота N_2O_4 частично диссоциирует в двуокись NO_2 . В откачанный сосуд объемом $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ вводится $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ жидкого N_2O_4 . Когда температура в сосуде поднялась до 300 К , жидкость испарилась и давление стало равным $1,26 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Сколько процентов четырехокси азота при этом диссоциирует?

§ 14. Молекулярно-кинетическая теория газов

14.1. В потоке молекул, летящих со скоростью v под углом α к направлению движения, расположена пластинка. Масса молекулы газа равна m , концентрация молекул z . а) Какое давление испытывает пластинка? Удары молекул о пластинку считать абсолютно упругими. Решите задачу при условии, что пластинка движется: б) навстречу потоку молекул со скоростью u ; в) в направлении своей нормали с той же скоростью.

14.2. Одноатомный идеальный газ квазистатически сжимается в цилиндре посредством передвижения поршня. Стенки цилиндра и поршень теплонепроницаемы. Исходя из кинетической теории газа, установите закон изменения давления газа в зависимости от его объема. Скорость движения поршня считать много меньшей скорости молекул.

14.3. Космический корабль массой M попадает в облако межпланетного газа. Газ состоит из молекул массой m и имеет температуру T . Концентрация молекул n настолько мала, что длина свободного пробега молекул во много раз больше линейных размеров корабля. Игнорируя распределением молекул по скоростям и считая удары молекул о корабль неупругими, оцените время, в течение которого скорость корабля уменьшится вдвое. Скоростью корабля по сравнению со скоростью молекул пренебречь.

14.4. Средняя кинетическая энергия материальной точки, совершающей пространственно ограниченное движение под действием гравитационных сил, равна половине ее потенциальной энергии, взятой с обратным знаком. Полагая, что средняя масса атомов Солнца равна примерно удвоенной массе протона $\langle m \rangle = 3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, оцените температуру внутри Солнца.

14.5. Плотность смеси азота и водорода при температуре 320 К и давлении $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ равна $0,3 \text{ кг/м}^3$. Какова объемная плотность кинетической энергии молекул азота в смеси?

14.6. Теплоизолированный сосуд разделен пополам тонкой перегородкой. В одной половине сосуда находится гелий при температуре T_1 и давлении p_1 , в другой — углекислый газ при температуре T_2 и давлении p_2 . Какова будет установившаяся температура смеси, если убрать перегородку.

14.7. Каковы среднеквадратичные скорости молекул кислорода, находящегося при давлении p и концентрации z_0 ?

14.8. При какой температуре среднеквадратичная скорость молекулы азота равна второй космической скорости для Земли?

14.9. Водород находится при такой температуре, что его коэффициент объемного расширения равен $1/300$ $1/K$, а коэффициент изотермического сжатия 10^{-5} $1/Па$. Какова: а) концентрация молекул газа; б) наиболее вероятная скорость молекул водорода?

14.10. Идеальный газ находится в баллоне объемом V при нормальных условиях. Сколько молекул газа имеют кинетические энергии в интервале от ϵ до $\epsilon + d\epsilon$?

14.11. В баллоне объемом 10^{-2} $м^3$ находится водород при температуре 273 К и давлении 10^5 Па. Найдите число молекул водорода, скорости которых отличаются на 0,1% от: а) наиболее вероятной скорости; б) средней квадратичной скорости. Каково относительное число этих молекул?

14.12. Самое высокое место, обжитое человеком на земном шаре, находится на высоте 5200 м над уровнем моря. Самая глубокая в мире шахта имеет глубину 10^4 м. На сколько отличается давление воздуха в этих местах? При расчете принять массу моля воздуха 29 г/моль, температуру 273 К. Предположение об изотермичности атмосферы является грубым приближением, поэтому полученный ответ следует рассматривать лишь как оценку искомой величины.

14.13. Оцените среднюю температуру атмосферы Земли, зная, что на высоте 230 км плотность воздуха равна 10^{-10} $кг/м^3$.

14.14. По мере увеличения высоты h над уровнем моря (примерно до 10 км) температура воздуха изменяется по закону $T = T_0 (1 - ah)$, где a — постоянная величина. По какому закону меняется давление газа в зависимости от h ? Давление воздуха на уровне моря равно p_0 .

14.15. Закрытый цилиндрический сосуд объемом V заполнен азотом при температуре T . Разность сил давления газа на дно и крышку сосуда при этом ΔF . Каково давление газа на дно и крышку сосуда в состоянии невесомости?

14.16. Шар-зонд диаметром D , наполненный гелием, поднимается вертикально вверх с поверхности Земли. а) Какой максимальной высоты достигнет шар, если предположить, что плотность воздуха меняется по барометрическому закону и температура атмосферы остается постоянной? Плотность воздуха у поверхности Земли ρ_0 , плотность гелия ρ_g , температура воздуха T , оболочка шара сделана из прорезиненной ткани и ее масса m . б) На сколько изменился бы объем шара при подъеме на предельную высоту,

если бы его оболочка могла растягиваться? Трением шара о воздух пренебречь.

14.17. Барабан центрифуги радиусом 0,5 м заполнен радоном ^{222}Rn и вращается, делая 50 об/с. а) Определите давление газа на стенки барабана, если в центре барабана давление 10^5 Па. Температуру газа по всему объему считать одинаковой и равной 300 К. б) По какому закону изменяется концентрация молекул внутри цилиндра в зависимости от расстояния x до оси барабана? в) По какому закону распределяется плотность радона в барабане?

14.18. До какого давления нужно откачивать дьюаровский сосуд, чтобы между его стенками был вакуум? Расстояние между стенками равно $l = 10^{-2}$ м, температура окружающей среды $T = 293$ К.

14.19. «Диаметр» молекулы кислорода приблизительно равен 3 Å. а) Вычислите среднюю длину свободного пробега и среднее время между двумя столкновениями молекулы кислорода при нормальных условиях. б) Оцените эти величины для протонов космических лучей Галактики, полагая, что в межзвездном газе средние значения скорости, концентрации и диаметр протонов равны соответственно $v \sim c$, $n_0 = 10^4 \text{ 1/м}^3$, $\sigma \sim 2 \cdot 10^{-15}$ м.

14.20. В баллоне объемом $2,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ содержится углекислый газ при температуре 400 К и давлении 1,3 Па. Сколько столкновений происходит между молекулами за 1 с?

14.21. Средняя квадратичная скорость молекул аргона при давлении 10^5 Па равна 414 м/с. Определите среднюю длину свободного пробега молекул аргона и частоту их столкновений.

14.22. В сосуде объемом V находится водород массой m . Эффективный диаметр молекул водорода σ . Во сколько раз отличается среднее расстояние между молекулами газа от средней длины свободного пробега?

14.23. В баллоне объемом V находится кислород при нормальных условиях. Температура баллона поддерживается постоянной. Баллон помещен в вакуум. а) Как будет меняться с течением времени давление газа в баллоне, если в нем образуется отверстие диаметром d , значительно меньше длины свободного пробега молекул? б) Как изменится ответ, если полностью откачанный баллон поместить в атмосферу кислорода при тех же условиях?

14.24. Давление воздуха между стенками дьюаровского сосуда при температуре 289 К равно $3,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Каково давление воздуха на стенки сосуда, если в сосуд налить жидкий воздух, имеющий температуру 93 К? При расчете считать температуру наружной стенки неизменной, а расстояние между стенками сосуда меньшим длины свободного пробега молекул.

14.25. Эффективное сечение иона H_2 в водородной плазме, находящейся при температуре 10^7 К, равно $4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Определите коэффициент диффузии ионов водорода при концентрации ионов, равной 10^{21} 1/м^3 ?

14.26. Два газа, находящиеся в сильно разреженных состояниях при температурах T_1 и T_2 и давлениях p_1 и p_2 , разделены тонкой перегородкой, в которой имеется маленькое отверстие диаметром d , много меньшим длины свободного пробега молекул. Массы молей газов равны μ_1 и μ_2 . Сколько газа будет каждую секунду проходить через отверстие? При каком соотношении между давлениями и температурами происходит только диффузия газов, но не эффузия? В каком случае расход газа через отверстие будет максимальным?

14.27. В дьюаровском сосуде находится жидкий воздух при температуре $T_1 = 93$ К. Поверхность стенок сосуда $S = 6 \cdot 10^{-2}$ м², расстояние между стенками $l = 10^{-2}$ м. Температура окружающего воздуха $T_2 = 290$ К, давление между стенками сосуда при температуре T_2 равно $p = 0,13$ Па, эффективный диаметр молекул воздуха $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м, удельная теплота испарения жидкого воздуха $r = 202$ Дж/кг. Сколько жидкого воздуха испарится в сосуде Дьюара за время $t = 1$ ч?

14.28. Экспериментальное значение коэффициента теплопроводности для газообразного гелия равно $0,14$ Вт/(м·К). Вычислите средний диаметр атома He и среднее время между соударениями атомов. Удельная теплоемкость He при постоянном объеме $3,1 \times 10^3$ Дж/(кг·К).

14.29. Коэффициент вязкости насыщенного водяного пара при нормальном давлении $1,2 \cdot 10^{-4}$ Пз. Вычислите средний диаметр молекулы пара.

14.30. Вычислите скорость установившегося движения стального шарика радиусом 10^{-3} м в атмосфере кислорода при температуре 373 К и нормальном давлении. Коэффициент теплопроводности O_2 при указанной температуре равен $3,25 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

14.31. Капли дождя падают под углом 15° к вертикали при скорости ветра $14,8$ м/с. Оцените средний диаметр капель, если вязкость воздуха $1,83 \cdot 10^{-4}$ кг/(м·с).

14.32. Для определения коэффициента внутреннего трения углекислого газа им наполнили колбу объемом $V = 10^{-3}$ м³ при давлении $p_1 = 2,1$ Па. Затем открыли кран, позволяющий газу вытекать из сосуда через капилляр длиной $l = 0,10$ м и радиусом $r = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м. Спустя время $t = 22$ мин давление в колбе понизилось до $p_2 = 1,77$ Па. Вычислите коэффициенты вязкости и диффузии газа. Наружное давление $p_0 = 0,97$ Па; процесс считать изотермическим, происходящим при температуре $T = 288$ К.

14.33. Оцените коэффициент вязкости аргона при температуре 293 К и давлении 10^5 Па. Для определения размеров атома Ar воспользуйтесь тем экспериментальным фактом, что при низких температурах твердый аргон имеет гранецентрированную кристаллическую решетку и его плотность равна $1,65 \cdot 10^3$ кг/м³. Атомы аргона считайте при этом твердыми шариками, касающимися друг друга.

14.34. Между двумя очень длинными коаксиальными цилиндрами радиусами R и $r \ll R$ находится газ с коэффициентом вязко-

сти η . Внешний цилиндр вращается с угловой скоростью ω , внутренний неподвижен. Чему равен момент силы трения, действующий на единицу длины внутреннего цилиндра?

14.35. Над неподвижным диском радиусом R на упругой нити с модулем кручения α подвешен второй диск массой m того же радиуса. Расстояние между дисками l . Период свободных крутильных колебаний диска в вакууме равен T_0 , в исследуемом газе логарифмический декремент затухания оказывается равным δ . Определите: а) коэффициент вязкости газа; б) угол, на который повернется верхний диск, если нижний диск начнет вращаться с угловой скоростью ω . Краевыми эффектами пренебречь, движение газа между дисками считать ламинарным.

§ 15. Термодинамика

15.1. В калориметре с ничтожно малой теплоемкостью находится вода массой 1 кг при температуре 283 К. В воду опускают спираль электронагревателя и бросают пластинку алюминия массой 0,4 кг, охлажденную до температуры 73 К. Мощность нагревателя 800 Вт. Какая температура установится в калориметре спустя 30 с после включения тока?

15.2. В холодильник, потребляющий мощность 200 Вт, поместили воду массой 2,0 кг при температуре 301 К. Через 30 мин вся вода превратилась в лед при температуре 268 К. Сколько теплоты рассеивал холодильник в окружающее пространство за это время?

15.3. Тигель, содержащий некоторое количество олова, нагревается электрическим током. Выделяемое в единицу времени количество теплоты постоянно. За 10 мин олово нагрелось от 293 до 343 К. Еще через 83 мин олово полностью расплавилось. Найдите удельную теплоемкость олова. Теплоемкостью тигеля и потерями теплоты в окружающее пространство пренебречь.

15.4. На сколько изменится удельная теплота плавления вещества при понижении температуры плавления на ΔT , если теплоемкости вещества в жидкой и твердой фазах равны соответственно c_1 и c_2 ?

15.5. Лед помещен в теплонепроницаемую оболочку и находится при нормальных условиях. Как изменится температура системы и какая часть льда расплавится, если его подвергнуть всестороннему сжатию до давления 10^7 Па? Удельные объемы воды и льда равны соответственно 10^{-3} м³/кг и $1,11 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; теплоемкости льда и воды связаны соотношением $c_{\text{л}} = 0,6 c_{\text{в}}$. Изменением объема льда при сжатии пренебречь.

15.6. Для диссоциации воды объемом 10^{-3} м³ нужно сжечь 1,08 кг угля при к. п. д. установки 50%. Сколько теплоты выделяется в процессе образования воды при сжигании 10^{-3} кг водорода? Удельная теплота сгорания угля равна $29,4 \cdot 10^3$ кДж/кг.

15.7. Поезд массой $1,5 \cdot 10^6$ кг идет по горизонтальному пути со скоростью 60 км/ч. Расход топлива при этом составляет 100 кг/с.

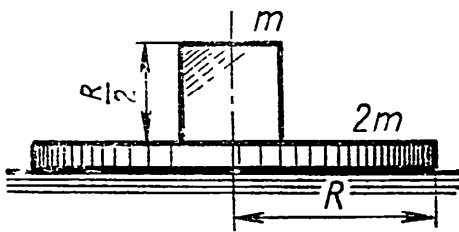


Рис. 15.1.

Какую скорость разовьет поезд при тех же условиях на пути с уклоном $0,01$ вверх? Коэффициент полезного действия двигателей 15% , удельная теплота сгорания топлива равна $46 \cdot 10^3$ кДж/кг.

15.8. Вал диаметром $0,1$ м вращается в подшипнике скольжения со скоростью 200 об/мин и давит на подшипник с силой 12 кН. Сколько нужно пропустить масла в час для охлаждения подшипника, если температура масла в процессе охлаждения повышается на 48 К? Коэффициент трения скольжения $0,015$, удельная теплоемкость масла равна $1,62$ кДж/(кг·К).

15.9. Две льдинки с массами 10^{-3} и $2 \cdot 10^{-3}$ кг, имеющие температуру 263 К, летят навстречу друг другу. Какова должна быть скорость сближения льдинок, чтобы при ударе они обратились в пар?

15.10. Горизонтально летящая пуля массой m попадает в деревянный шар массой $M = 5m$, лежащий на гладком горизонтальном столе. Перед ударом пуля имела скорость v и вращалась вокруг своей оси симметрии с угловой скоростью $\omega = v/r$. Полагая удар центральным и неупругим, определите количество теплоты, выделившейся при ударе. Радиус шара R , радиус инерции пули $r \ll R$.

15.11. На идеально гладкой горизонтальной поверхности лежит диск массой $2m$ и радиусом R . На диск с небольшой высоты упал кубик с ребром $R/2$ и массой m (рис. 15.1), вращающийся с угловой скоростью ω . Вследствие неупругого удара кубик проворачивается относительно диска на некоторый угол и затем вращение системы происходит без проскальзывания. Сколько теплоты выделилось за счет трения между кубиком и диском?

15.12. Железный кубик массой m_1 и медный массой m_2 стоят на теплопроводящей подставке. На сколько изменится теплоемкость системы, если один из кубиков положить на другой?

15.13. Газ при нормальных условиях имеет плотность ρ . Чему равны его удельные теплоемкости c_p и c_v ?

15.14. В вертикальном цилиндрическом сосуде высотой h находится моль идеального газа. Найдите теплоемкость этого газа, учитывая наличие поля тяжести и предполагая, что $\mu g h \ll RT$, где μ — масса моля газа. Расширением сосуда при нагревании пренебречь.

15.15. Азот занимает объем $V_1 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м³ при давлении $p_1 = 10^5$ Па. На сколько изменилась внутренняя энергия газа, если при его сжатии до объема $V_2 = 0,1 V_1$ давление повысилось до $p_2 = 20 p_1$?

15.16. В баллоне емкостью 10^{-3} м³ находится кислород под давлением 10^7 Па при температуре 300 К. К газу подводят $8,35$ кДж теплоты. Определите температуру и давление газа после нагревания.

15.17. Два одинаковых сосуда (с одинаковой концентрацией молекул кислорода и азота) соединены между собой короткой трубкой с краном. В первом сосуде средняя квадратичная скорость молекул 400 м/с, во втором 500 м/с. Какова будет наиболее вероятная скорость движения молекул, если открыть кран, соединяющий сосуд, и дать газам перемешаться? Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

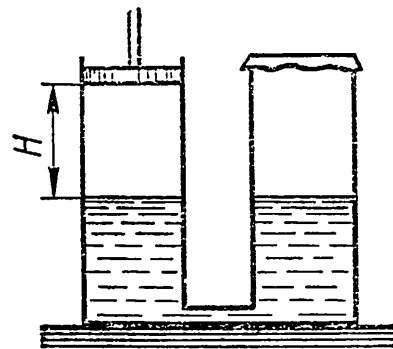


Рис. 15.2.

15.18. В сосуде объемом V при температуре T находится гремучая смесь, состоящая из водорода массой m и кислорода массой $8m$. Какое максимальное давление установится в сосуде после взрыва смеси? Во сколько раз оно отличается от начального давления? Количество теплоты, выделяющееся при образовании воды единичной массы, равно q , удельная теплоемкость водяного пара при постоянном объеме c_V .

15.19. Два сообщающихся сосуда одинакового сечения S залиты водой (рис. 15.2). Левый сосуд закрыт легким поршнем, который может скользить в цилиндре без трения, правый — крышкой. Высота столба воздуха под поршнем и крышкой H , давление воздуха равно атмосферному p_0 . Какую работу нужно совершить, чтобы изотермически сместить поршень вниз на расстояние $H/2$ от его начального уровня?

15.20. В закрытом сосуде находится моль льда при температуре 273 К. Какое количество теплоты потребуется для нагревания системы до 373 К? Объем сосуда таков, что весь лед при нагревании превращается в насыщенный пар. Теплоемкостью стенок пренебречь.

15.21. В цилиндре под поршнем находится азот массой m при температуре T_1 и давлении p_1 . Газ изотермически расширился, и его объем стал равным V_2 . а) Найдите работу газа и количество теплоты, подведенное к газу. б) Решите задачу при условии, что газ расширился изобарически.

15.22. В процессе изобарического нагревания киломоля углекислого газа было подведено количество теплоты Q . На сколько изменилась температура газа? Чему равны изменения внутренней энергии и работа газа?

15.23. При давлении 10^5 Па для нагревания 1,0 кг аргона на 2 К необходимо затратить $1,1 \cdot 10^6$ Дж теплоты. При охлаждении газа от 373 до 273 К при постоянном объеме $5 \cdot 10^{-3}$ м³ выделяется $2,1 \cdot 10^6$ Дж теплоты, если начальное давление газа 10^6 Па. Определите по этим данным значение c_p/c_V .

15.24. Воздух массой m находится под давлением p_1 и изотермически сжимается до давления p_2 , при этом совершается работа A . В конце сжатия при постоянном давлении к газу подводят теплоту, равную отведенной при изотермическом сжатии. Каковы конечные параметры состояния газа?

15.25. Идеальный газ находится в теплоизолированном цилиндре под поршнем при температуре T_1 и давлении p_1 . Какова установившаяся температура газа, если его давление изменилось до p_2 квазистатически; скачкообразно?

15.26. Из баллона, содержащего водород под давлением 10^6 Па при температуре 291 К, выпустили половину газа. Считая процесс адиабатическим, определите установившееся давление и температуру газа.

15.27. Вертикальный теплоизолированный цилиндрический сосуд разделен на две части поршнем массой M и площадью S . Под поршнем находится ν молей двухатомного идеального газа, над поршнем — вакуум. При закрепленном поршне газ занимает объем V_0 при температуре T_0 . Затем поршень освобождают и после нескольких колебаний он приходит в равновесие. Каковы объем и температура газа во втором состоянии?

15.28. Кислород массой 0,1 кг сжимается адиабатически, температура газа при этом возрастает с 273 до 373 К. Во сколько раз изменится объем и давление газа? Чему равны приращение внутренней энергии и работа, совершенная при сжатии газа?

15.29. При изотермическом расширении водорода массой m , взятого в объеме V при давлении p , была совершена работа A . Каковы будут параметры состояния, если после изотермического расширения газ адиабатически сжимать до тех пор, пока не будет совершена такая же работа, что при изотермическом расширении?

15.30. Идеальный газ состоит из смеси двух киломолей одноатомного газа и 0,5 кмоль двухатомного. Чему равен показатель адиабаты газа?

15.31. Полагая, что воздух, поднимаясь в атмосфере, расширяется как идеальный газ, установите закон изменения температуры воздуха с высотой. На сколько уменьшается температура на высоте 1 км? Для воздуха $\gamma = 1,4$.

15.32. Баллон массой 25 кг содержит кислород массой 1,0 кг при давлении, значительно большем атмосферного, и температуре 300 К. Какую скорость приобретет баллон, если внезапно газ вырвется наружу? Теплопередачей пренебречь.

15.33. Мяч объемом V заполнен воздухом при давлении p и температуре T . На сколько нагреется воздух внутри мяча, если он упадет на землю с высоты H и на нагревание воздуха пойдет половина выделившейся энергии? Какова средняя энергия молекул воздуха после падения мяча на землю? Во сколько раз возрастет при нагревании воздуха наиболее вероятная скорость молекул (средняя арифметическая, средняя квадратичная)?

15.34. В цилиндре под легким подвижным поршнем находится гремучий газ объемом 10^{-4} м³ при температуре 293 К и давлении 10^5 Па. С какой высоты должен упасть на поршень груз массой 5,0 кг, чтобы газ воспламенился? Температура воспламенения гремучей смеси 773 К. Каковы давление и плотность смеси перед воспламенением?

15.35. В вертикальном цилиндре, закрытом с нижнего конца, может двигаться без трения поршень массой m . Под поршнем находится идеальный газ, масса которого ничтожно мала по сравнению с массой поршня. В положении равновесия поршень отстоит от дна цилиндра на расстоянии l_0 , площадь сечения поршня S . Определите период малых колебаний поршня около положения равновесия, считая процессы сжатия и расширения газа: изотермическими; адиабатическими. Атмосферное давление p_0 .

15.36. Теплоизолированный горизонтальный цилиндрический сосуд, закрытый с обоих концов, заполнен идеальным газом, находящимся под давлением p_0 . Сосуд имеет объем $2V$ и разделен посередине легким подвижным поршнем массой m и площадью S . Чему равен период малых колебаний поршня, которые возникнут, если поршень сместить из положения равновесия и затем отпустить? Потерями энергии на трение пренебречь. Как изменится ответ, если цилиндр поставить вертикально?

15.37. Какая часть молекул парообразного иода диссоциирована на атомы при температуре 873 К, если удельная теплоемкость c_p , измеренная при этой температуре, оказалась равной 1,38 Дж/(кг·К)?

15.38. По какому закону меняется коэффициент теплопроводности, вязкости и диффузии двухатомного газа при его сжатии: а) изотермически; б) адиабатически? Эффективный диаметр молекул газа считать постоянным.

15.39. Температура горения топлива ракетных двигателей 3000 К, средняя масса моля продуктов горения 30 г/моль. Полагая, что истечение газа происходит в вакууме адиабатически, рассчитайте, во сколько раз стартовая масса одноступенчатой ракеты должна быть больше массы конструкции, чтобы ракета могла набрать первую космическую скорость. Молярную теплоемкость продуктов горения принять равной 33,5 кДж/(кмоль·К). Действием силы тяжести пренебречь.

15.40. В цилиндре под поршнем находится окись углерода массой m при давлении p . Газ политропически нагревают до температуры T , в результате чего давление газа возрастает вдвое. Удельная теплоемкость газа c . Определите показатель политропы; количество теплоты, подведенной к газу; работу, совершенную газом, и изменение его внутренней энергии.

15.41. При расширении идеального газа его давление менялось по закону: а) $p = p_0 + aV$; б) $p = b/V^2$, где a и b — некоторые постоянные величины. Найдите молярную теплоемкость газа в указанных процессах.

15.42. В процессе нагревания идеального газа его молярная теплоемкость менялась по закону: а) $c = a/T$; б) $c = aT$, где a — постоянная величина. Какими уравнениями связаны между собой давление p и объем V газа, объем V и температура T в этом процессе? Чему равна работа A одного киломоля газа при нагревании его от температуры T_1 до T_2 ?

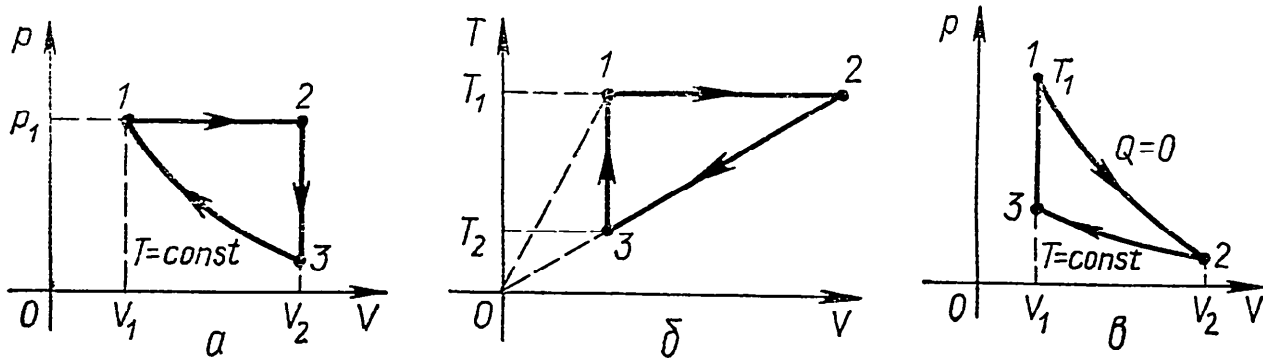


Рис. 15.3.

15.43. Один моль углекислого газа, находящийся при нормальных условиях, расширяется так, что с увеличением объема его температура меняется по закону $T = bV - aV^2$. а) Найдите изменение внутренней энергии газа при увеличении его объема в два раза. При каком условии внутренняя энергия газа в результате расширения не изменится? б) Определите работу газа при расширении. в) Получите закон изменения теплоемкости газа в зависимости от температуры.

15.44. Многоатомный идеальный газ, имеющий массу m и молекулярную массу μ , нагревают в цилиндре под поршнем так, что температура газа оказывается пропорциональной квадрату давления ($T = kp^2$, где k — некоторый постоянный коэффициент). Какую работу совершает газ при увеличении давления от p_1 до p_2 ? Какое количество теплоты нужно при этом сообщить газу?

15.45. На рисунке 15.3, а, б и в даны диаграммы трех процессов в двухатомном идеальном газе. Параметры состояния киломоля газа указаны на диаграммах. Постройте диаграммы $T - V$ и $p - V$ циклов. Какая работа совершена газом за цикл?

15.46. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температуры нагревателя и холодильника равны соответственно 673 и 293 К. Рабочим телом служит воздух массой 2 кг. Зная, что давление воздуха в конце изотермического расширения равно давлению в начале адиабатического сжатия и цикл протекает 1 с, определите мощность: а) подводимую к машине; б) машины.

15.47. Идеальная машина, работающая по обратному циклу Карно, забирает тепло от воды, имеющей начальную температуру 273 К, и передает его кипятильнику с водой, имеющему температуру 373 К. Сколько воды превращается в пар при образовании 1 кг льда?

15.48. Двухатомный идеальный газ, имеющий массу, равную одному киломолю, совершает циклы, указанные на рисунке 15.4, а, б, в и г. Известные параметры состояния газа отмечены на чертеже. Определите: а) как изменяется температура газа при изменении его объема, постройте диаграмму $T = f(V)$; б) к. п. д. цикла; в) между какими температурами совершается цикл б; г) работу газа в цикле г.

15.49. На рисунке 15.5 приведен цикл, в котором рабочим телом является идеальный газ, — цикл Отто (цикл карбюраторного

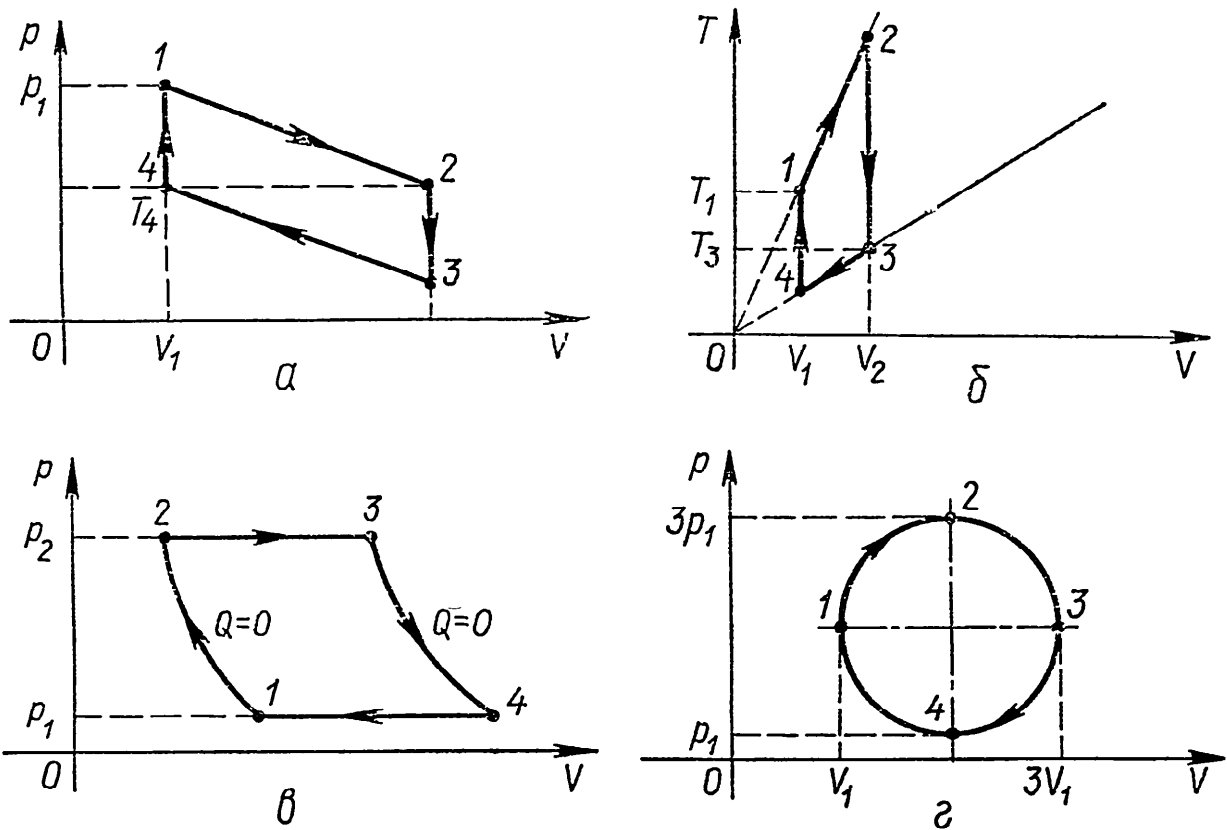


Рис. 15.4.

и газового четырехтактного двигателей). Полагая γ постоянным, определите к. п. д. цикла через параметры, указанные на чертеже.

15.50. Двигатель внутреннего сгорания, работающий по циклу Дизеля (рис. 15.6), развивает мощность 36,8 кВт, расходуя топливо с удельной теплотой сгорания $4,6 \cdot 10^4$ кДж/кг. Степень адиабатического сжатия смеси равна 16, степень изобарического расширения 6,4, показатель политропы 1,3. Определите расход топлива в двигателе за час.

15.51. На рисунке 15.7 показан цикл киломоля газа с постоянными теплоемкостями c_p и c_v . Какова температура газа в конце изобарического сжатия, если температура газа в точках 1, 2 и 3 равна соответственно 300, 600 и 400 К? Чему равна работа газа за цикл?

15.52. Вода, имеющая массу 1 кг и температуру 273 К, приведена в контакт с большим тепловым резервуаром, нагретым до тем-

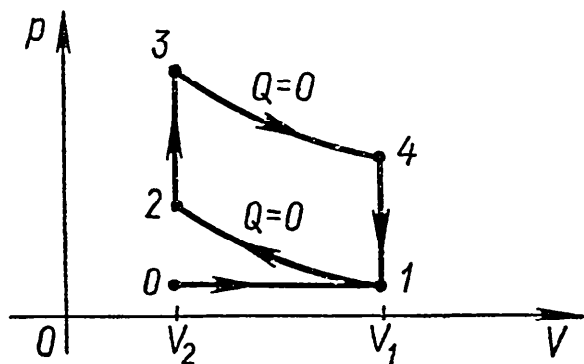


Рис. 15.5.

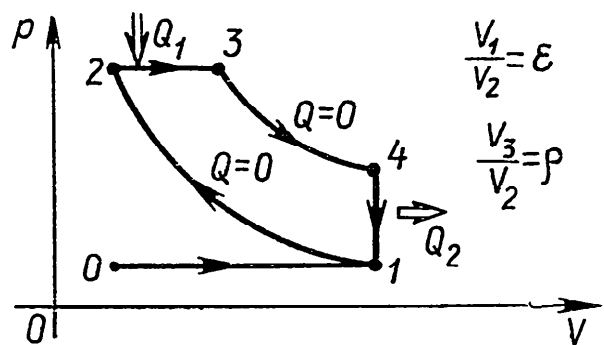


Рис. 15.6.

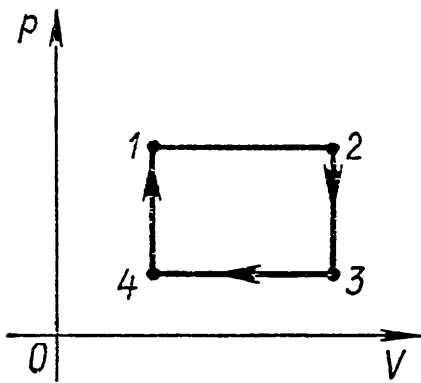


Рис. 15.7.

температуры 373 К. а) Чему равно изменение энтропии системы после того, как установится тепловое равновесие? б) Каково изменение энтропии системы, если воду сначала привести в контакт с резервуаром при температуре 323 К, а затем с резервуаром, находящимся при температуре 373 К?

15.53. Чему равно изменение энтропии $3 \cdot 10^{-2}$ кг льда при превращении его в пар, если начальная температура льда 233 К, а температура пара 373 К? Теплоемкости

воды и льда считать постоянными, а все процессы — проходящими при атмосферном давлении.

15.54. В калориметре с ничтожно малой теплоемкостью находится 0,25 кг воды при температуре 296 К. Как изменится энтропия системы, если в воду бросить кусочек льда массой $2,5 \cdot 10^{-2}$ кг при температуре 268 К и одновременно пустить $2,5 \cdot 10^{-2}$ кг пара при температуре 373 К? Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

15.55. Найдите приращение энтропии водорода массой $2 \cdot 10^{-4}$ кг: а) при его нагревании от температуры T_1 до $2T_1$ в изохорическом и изобарическом процессах; б) при расширении газа от объема V_1 до $3V_1$ в изобарическом и изотермическом процессах.

15.56. Гелий, находившийся в тонкостенном резиновом мешке объемом $2 \cdot 10^{-2}$ м³ при нормальном давлении, в результате длительного хранения продиффундировал наружу. Оцените изменение энтропии гелия. В обычном воздухе на один атом гелия приходится 10^7 молекул других газов. Какую минимальную работу нужно было бы совершить, чтобы собрать гелий обратно в мешок?

15.57. Идеальный газ, имеющий массу m и молекулярную массу μ , адиабатически расширяется в вакуум от объема V_1 до объема V_2 . Вычислите возрастание энтропии газа и покажите, что процесс расширения является необратимым.

15.58. Два баллона объемами V_1 и V_2 , соединенные короткой трубкой с краном, содержат при одинаковом давлении одинаковое количество азота массой m при температурах T_1 и T_2 . а) Как изменится энтропия системы, если открыть кран и дать газам перемешаться? б) Решите задачу при условии, что одинаковы были температуры газа, но различны давления.

15.59. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы изотермически сжать киломоль идеального газа от давления p_1 до давления p_2 при температуре T_0 ? Атмосферное давление p_0 .

15.60. В качестве нагревателя и холодильника тепловой машины используются два тела, имеющие температуры T_2 и $T_1 < T_2$. Теплоемкости C обоих тел одинаковы и не зависят от температуры. а) Воспользовавшись понятием энтропии, определите температуры тел после установления теплового равновесия. б) Какую максимальную работу может совершить такая машина?

15.61. При температуре 273 К молярная теплота плавления льда $6 \cdot 10^6$ Дж/кмоль. Холодильник должен произвести тонну льда при температуре 298 К. Какое минимальное количество электроэнергии для этого необходимо?

15.62. Один киломоль воды охлаждается от 298 до 273 К и замерзает. Вся выделившаяся теплота с помощью идеального рефрижератора идет на нагревание одного киломоля воды от 298 до 373 К и ее частичное выкипание. Сколько киломолей воды переходит в пар и какую работу совершает рефрижератор в данном процессе? Молярная теплота кипения воды $4 \cdot 10^7$ Дж/кмоль, молярная теплота плавления льда $0,6 \cdot 10^7$ Дж/кмоль.

§ 16. Реальные газы. Пары. Жидкости

16.1. В сосуде объемом $2 \cdot 10^{-2}$ м³ при температуре 300 К находится 0,05 кмоль углекислого газа. Поправки Ван-дер-Ваальса для CO₂ равны $a = 3,6 \cdot 10^5$ Н·м⁴/кмоль, $b = 0,043$ м³/кмоль. Определите давление газа.

16.2. В баллоне объемом 0,01 м³ находится 0,32 кг кислорода при давлении $2,5 \cdot 10^5$ Па. Критические давление и температура кислорода соответственно равны $25 \cdot 10^5$ Па и 154 К. Определите температуру газа. Сравните полученный результат с тем, который мы имели бы, считая газ идеальным.

16.3. Зная величину критических параметров газа $p_{кр}$ и $V_{кр}$, определите температуру, при которой уравнение состояния Ван-дер-Ваальса оказывается тождественным уравнению Менделеева — Клапейрона.

16.4. Критические давление и температура неона равны соответственно $27,3 \cdot 10^5$ Па и 44,5 К. Определите по этим данным эффективный диаметр молекул неона.

16.5. Ван-дер-ваальсовский газ, имеющий температуру T и массу ν киломолей, изотермически сжимается от объема V_1 до объема V_2 . Найдите: а) работу газа; б) приращение внутренней энергии; в) количество выделившейся теплоты.

16.6. Азот при критической температуре 126 К имеет критический объем 0,12 м³/кмоль. Считая, что азот подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса, найдите понижение температуры 0,07 кг азота при расширении газа в вакуум от объема $V_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м³ до объема $V_2 = 2V_1$.

16.7. Два баллона объемами V_1 и V_2 соединены трубкой с краном. В первом баллоне находится киломоль азота при давлении p , во втором — вакуум. Кран открывают, и азот заполняет второй сосуд. Считая газ ван-дер-ваальсовским, определите количество теплоты, которое нужно подвести к газу, чтобы: а) его температура не изменилась; б) не изменилось давление.

16.8. Критические давление и температура двух киломолей гелия, находящегося в сосуде объемом 1 м³, равны соответственно $23 \cdot 10^5$ Па и 0,005 К. На сколько отличаются энтропии газа, если считать газ идеальным и ван-дер-ваальсовским?

16.9. В сосуде объемом $V \gg b$ при температуре T находится киломоль газа, параметры состояния которого подчиняются уравнению Ван-дер-Ваальса. Найдите разность молярных теплоемкостей $C_p - C_v$ и температуру T_x , при которой она наибольшая.

У к а з а н и е. Для нахождения T_x нужно рассмотреть газ в критическом состоянии.

16.10. В длинном вертикальном цилиндрическом сосуде под легким поршнем площадью $0,01 \text{ м}^2$ находится $0,01 \text{ кг}$ воды при температуре 273 К . В воду опущена спираль нагревателя мощностью 100 Вт . Пренебрегая потерями теплоты, определите, на какую высоту поднимется поршень спустя 5 мин после включения нагревателя. Атмосферное давление нормальное, удельная теплоемкость водяного пара $2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

16.11. В баллон объемом 10^{-2} м^3 , наполненный сухим воздухом при давлении 10^5 Па и температуре 273 К , вводят $3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ воды и нагревают баллон до температуры 373 К . Чему равно давление влажного воздуха в баллоне?

16.12. В закрытом с обоих концов цилиндре объемом 10^{-3} м^3 свободно ходит тонкий легкий поршень. Под поршнем находится $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ воды, над поршнем — столько же азота. Вся система имеет температуру $T_1 = 373 \text{ К}$. На сколько изменятся объемы пара и газа, если всю систему охладить на 50 К ? Давление насыщающих паров воды при температуре 323 К равно $0,48 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

16.13. В цилиндре под легким незакрепленным поршнем находится насыщенный водяной пар объемом 1 м^3 . Сколько льда, взятого при температуре 273 К , нужно бросить в сосуд, чтобы весь пар сконденсировался? Атмосферное давление нормальное, теплоемкостью и теплоотдачей цилиндра пренебречь.

16.14. Под легким поршнем в цилиндре сечением $0,1 \text{ м}^2$ находится 1 кг воды при температуре 273 К . В воду опускают кусок раскаленного железа массой 1 кг . До какой температуры было нагрето железо, если поршень поднялся после этого на $0,64 \text{ м}$? Атмосферное давление нормальное, теплоотдачей и теплоемкостью цилиндра пренебречь.

16.15. В сосуде объемом $0,1 \text{ м}^3$ при температуре 303 К находится воздух с относительной влажностью 30% . а) Какова будет относительная влажность, если в сосуд ввести 10^{-3} кг воды, имеющей ту же температуру? б) Какова станет влажность, если объем изотермически уменьшить в 10 раз? Давление насыщающих паров воды при 303 К равно $4,2 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

16.16. Шар-зонд объемом 15 м^3 удерживается веревкой в равновесии при температуре воздуха 280 К . Вследствие увеличения влажности воздуха натяжение веревки изменилось на $0,7 \text{ Н}$. Давление насыщающих паров воды при 280 К равно $1,9 \cdot 10^3 \text{ Па}$. На сколько изменилась влажность воздуха?

16.17. Два баллона объемами 1 и 2 м^3 соединены трубкой с краном. В первом баллоне находится воздух с влажностью 20% , во втором — 40% . Температура в обоих баллонах 350 К , давление

соответственно 10^5 и $2 \cdot 10^5$ Па. Кран открывают, и пар перемешивается. Определите относительную влажность воздуха и давление влажного воздуха.

16.18. Определите удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении, содержащего 20% водяного пара. Сухой воздух считать двухатомным газом с массой моля 29 г.

16.19. Чтобы обратить в пар 1 кг воды при температуре 373 К, необходимо затратить энергию $2,3 \cdot 10^6$ Дж. Определите, какая часть этой энергии идет на преодоление межмолекулярных сил. На что расходуется остальная энергия?

16.20. Два одинаковых полых металлических шара объемом $4,45 \cdot 10^{-3}$ м³, один из которых хорошо откачан, а второй наполнен кислородом при давлении $2 \cdot 10^6$ Па, поместили в камеру, через которую пропускается насыщающий водяной пар при температуре 373 К. Начальная температура шаров 300 К. После того как температура шаров и пара выравнялась, на первом шаре сконденсировалась вода массой 10^{-2} кг, на втором — $1,24 \cdot 10^{-2}$ кг. Пренебрегая тепловым расширением шаров, определите по этим данным удельную теплоту парообразования воды.

16.21. В закрытом сосуде объемом $5 \cdot 10^{-3}$ м³ находится 1 кг воды при температуре 373 К. Пространство над водой занято насыщенным паром. На сколько увеличится масса насыщенного пара при повышении температуры системы на 1 К?

16.22. Давление насыщенного пара аммиака при температуре 273 К равно $5,504 \cdot 10^5$ Па, а при температуре 283 К — $6,06 \cdot 10^5$ Па. Определите по этим данным удельную теплоту парообразования аммиака при температуре 273 К.

16.23. Давление паров твердого и жидкого аммиака (в мм рт. ст.) связано с их температурой эмпирическими формулами соответственно $p = 23,03 - 3754/T$ и $p = 19,49 - 3063/T$. Найдите в тройной точке: а) температуру аммиака; б) молярную теплоту сублимации и испарения; в) молярную теплоту плавления аммиака.

16.24. В закрытом сосуде при температуре 293 К находится воздух с относительной влажностью 80%. Удельная теплота парообразования воды при этой температуре $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг. Чему равна точка росы влажного воздуха в сосуде?

16.25. Лед, взятый при температуре 273 К, адиабатически сжимается до давления 10^7 Па. Какая часть льда при этом расплавится?

16.26. При температуре 273 К упругость водяного пара над льдом $6,55 \cdot 10^2$ Па. Удельная теплота плавления льда и испарения воды при температуре T_0 равны $3,34 \cdot 10^5$ Дж/кг и $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг. Найдите упругость водяного пара над льдом при температуре $T_2 = 272$ К.

16.27. При температуре 373 К удельная теплота кипения воды и плотность насыщенного пара равны $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг и $0,6$ кг/м³, плотность воздуха $1,3$ кг/м³. Получите закон изменения температуры кипения с высотой, принимая за начало отсчета высоты уровень моря.

16.28. Капля воды радиусом 2 мм находится в воздухе с относительной влажностью 40% при температуре 293 К. Коэффициент диффузии пара $2,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с, плотность насыщенного пара над плоской поверхностью при данной температуре $1,7 \cdot 10^{-8}$ кг/м³. Через сколько времени испарится капля?

16.29. Для определения поверхностного натяжения жидкости взвешивают капли, отрывающиеся от капилляра, и измеряют диаметр d шейки капли в момент отрыва. Оказалось, что $n = 318$ капель жидкости имеют массу $m = 5 \cdot 10^{-3}$ кг при $d = 7 \cdot 10^{-4}$ м. Найдите поверхностное натяжение этой жидкости.

16.30. Круглая пластинка радиусом r и массой m удерживается на поверхности воды посредством легкой резинки, привязанной в центре пластинки. Коэффициент упругости резинки равен k , коэффициент поверхностного натяжения воды σ . Оцените, на какую минимальную высоту нужно поднять конец резинки, чтобы пластинку оторвать от воды. Начальным погружением пластинки и работой по подъему жидкости пренебречь, вторую кривизну боковой поверхности воды над пластинкой не учитывать.

16.31. Петлю из резинового шнура длиной l и поперечным сечением S положили на пленку жидкости. Пленку прокололи внутри петли, в результате чего она растянулась в окружность радиусом R . Полагая, что при малых растяжениях для резины справедлив закон Гука и модуль Юнга резины равен E , определите коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

16.32. В хорошо откачанную тонкостенную колбу радиусом 0,10 м налита вода. Температура окружающего воздуха 273 К, давление 10^5 Па. До какой максимальной температуры можно нагреть колбу, чтобы она не разорвалась, если предельное натяжение материала колбы на разрыв $8,4 \cdot 10^8$ Н/м? При расчете считать, что вода испаряется не полностью, но ее объем по сравнению с объемом пара очень мал.

16.33. Чему равна масса пара внутри воздушных пузырьков диаметром 10^{-4} м, находящихся на глубине 1 м под водой при атмосферном давлении 10^5 Па и температуре воды 290 К? Во сколько раз изменится объем пузырька, если он весь поднимется на поверхность воды? Давлением воздуха в пузырьках и изменением давления пара над искривленной поверхностью пренебречь.

16.34. Два мыльных пузыря радиусами R_1 и R_2 сливаются в один пузырь радиусом R_3 . Найдите коэффициент поверхностного натяжения мыльной пленки, если атмосферное давление равно p_0 .

16.35. Капля ртути массой m падает на стальную плиту с высоты H и при ударе разбивается на n мелких капель. Оцените количество теплоты, выделяемой при ударе. Коэффициент поверхностного натяжения ртути равен σ .

16.36. Оцените энергию, которая выделяется при слиянии капель во время дождя, полагая, что на единицу поверхности выпадает слой осадков толщиной h , диаметр капель, достигающих поверхности Земли, увеличивается по сравнению с первоначальным

в k раз и становится равным d . На сколько повышается температура воды в больших каплях по сравнению с малыми?

16.37. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром d при постоянной температуре и атмосферном давлении p_0 ?

16.38. Между двумя легкими стеклянными пластинками положили каплю ртути массой 10^{-2} кг. Сжав пластинки силой 63 Н, заметили, что ртуть приняла форму круглой лепешки радиусом 0,05 м. Чему равен краевой угол между ртутью и стеклом?

16.39. Две длинные стеклянные пластинки, параллельные друг другу, частично погружены в вертикальном положении в смачивающую жидкость. Расстояние между пластинками 10^{-3} м, их ширина 0,15 м. На какую высоту поднимется жидкость между пластинками? С какой силой притягиваются пластинки? Смачивание считать полным, коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости равны соответственно $7,3 \cdot 10^{-2}$ Н/м и 10^3 кг/м³.

16.40. Две стеклянные пластинки шириной s опущены в вертикальном положении в смачивающую жидкость так, что они образуют клин с малым углом φ . Плотность жидкости ρ , коэффициент поверхностного натяжения σ , краевой угол θ . Составьте уравнение поверхности жидкости между пластинками.

16.41. Капиллярная трубка с радиусом отверстия r опущена одним концом в воду. Коэффициент поверхностного натяжения, краевой угол и атмосферное давление равны соответственно σ , θ и p_0 . а) По какому закону изменяется давление в столбе жидкости с увеличением высоты? б) Как изменится высота столба жидкости в капилляре, если сосуд поднимать вертикально вверх с ускорением a ? в) Какой слой масла нужно налить сверху воды, чтобы уровень воды в трубке сравнялся с уровнем масла?

16.42. Коническая капиллярная трубка имеет малый угол при вершине конуса, равный α . Радиусы отверстий капиллярной трубки равны R и r . Трубку опускают в воду один раз широким концом, второй — узким. На какие высоты поднимается вода в капилляре?

16.43. В U-образный сосуд налита вода. Колена сосуда представляют собой капилляры с диаметрами 0,1 и 2 мм. а) Определите разность уровней воды в трубках. б) На сколько изменится разность уровней воды, если: сосуд поднимать вверх с ускорением a ; сосуд будет находиться в состоянии невесомости? в) На сколько изменится разность уровней, если вследствие нагревания коэффициент поверхностного натяжения воды уменьшится на $0,9 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

16.44. Две трубки с внутренними диаметрами 1 и 3 мм вставлены одна в другую. Внешний диаметр тонкой трубки 2 мм. Если трубки опустить в воду, то разность уровней воды в канале тонкой трубки и в промежутке между трубками равна $6 \cdot 10^{-3}$ м. Определите по этим данным коэффициент поверхностного натяжения воды.

16.45. Вертикально расположенный стеклянный капилляр длиной l запаян с верхнего конца. Если нижний конец капилляра привести в соприкосновение с поверхностью воды, то вода подни-

мется в нем на высоту h . Атмосферное давление нормальное. Чему равен диаметр капилляра?

16.46. Мыльный пузырь выдут через тонкую трубку длиной 0,1 м и внутренним радиусом 10^{-3} м. Когда радиус пузыря стал равен 0,1 м, дуть перестали, воздух из пузыря начал выходить через трубку и через 2 ч пузырь исчез. Поверхностное натяжение мыльного раствора $5 \cdot 10^{-2}$ Н/м. Считая плотность воздуха постоянной, определите его коэффициент вязкости.

16.47. На сколько отличается давление насыщенного пара над мениском в капиллярной трубке радиусом r от давления над плоской поверхностью смачивающей (несмачивающей) жидкости, если удельные объемы пара и жидкости равны $v_{\text{п}}$ и $v_{\text{ж}}$, а поверхностное натяжение жидкости σ ?

16.48. Оцените осмотическое давление $8 \cdot 10^{-3}$ кг этилового спирта ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), растворенного в 0,2 кг воды при температуре 294 К. Диссоциацией молекул пренебречь.

16.49. На сколько изменится температура кипения воды массой 1 кг, если в ней растворить 0,10 кг поваренной соли? Атмосферное давление нормальное, масса моля соли 58 г.

16.50. Если в воде растворить сахар, то температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении возрастает на 0,05 К. На сколько изменится температура замерзания раствора при этом давлении?

§ 17. Теплопроводность

17.1. Чайник, содержащий 1 кг воды, нагревается на плите. Толщина дна чайника $2 \cdot 10^{-3}$ м, площадь 0,03 м², разность температур между внутренней и наружной поверхностями дна равна $1,3 \cdot 10^{-2}$ К. Через сколько времени после начала кипения вся вода выкипит? Коэффициент теплопроводности дна 370 Вт/(м·К), дно нагревается равномерно.

17.2. Антикатод рентгеновской трубки представляет собой медный стержень длиной 0,25 м и диаметром $1,5 \cdot 10^{-2}$ м. Холодный конец стержня омывается проточной водой, которая нагревается на 3° С при расходе воды 1 кг/мин. Определите разность температур между горячим и холодным концами стержня, если потери тепла через боковую стенку ничтожно малы.

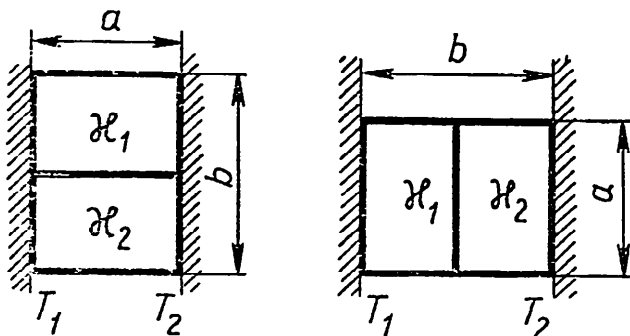


Рис. 17.1.

17.3. Вода в пруду имеет температуру 273 К. Температура окружающего воздуха 263 К. Какой слой льда образуется за 24 ч, считая с момента замерзания воды?

17.4. Две металлические пластинки с коэффициентом теплопроводности κ_1 и κ_2 сложены

вместе (рис. 17.1). Во сколько раз отличается теплопроводность системы для двух положений, указанных на рисунке. Размеры пластин одинаковы. Необходимые данные указаны на рисунке.

17.5. Между двумя металлическими стенками, имеющими температуры T_1 и T_2 , зажаты две пластинки толщиной d_1 и d_2 . Какая температура установится на поверхности соприкосновения пластинок? Коэффициенты теплопроводности пластинок κ_1 и κ_2 . Температурным скачком на границе металл—пластинка пренебречь.

17.6. В два сосуда, содержащих воду массой m_1 и m_2 при температурах T_1 и T_2 , опущен П-образный стержень сечением S . Часть стержня, находящаяся в воздухе, имеет длину l . Спустя время t разность температур воды стала ΔT . Полагая, что теплообмен между сосудами идет только через стержень, и пренебрегая потерями, определите теплопроводность стержня.

17.7. Сколько воды, имеющей температуру T_1 , нужно налить в закрытый тонкостенный сосуд с поверхностью S , чтобы спустя время t она остыла до температуры T_2 ? Температура наружного воздуха T_3 , коэффициент внешней теплопроводности на границе металл — воздух равен α .

17.8. Рассчитайте скорость теплопередачи между двумя концентрическими сферами радиусами R_1 и R_2 , имеющими температуры T_1 и T_2 , если коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего пространство между сферами, равен κ . По какому закону изменяется температура внутри вещества в зависимости от расстояния x , отсчитываемого от центра сфер до рассматриваемой точки?

17.9. Труба радиусом $3,5 \cdot 10^{-2}$ м и длиной 65 м находится в асбестовой оболочке радиусом $6,5 \cdot 10^{-2}$ м. Температуры поверхностей трубы и теплоизоляции равны 393 и 323 К. Коэффициент теплопроводности оболочки $0,21$ Вт/(м·К). Найдите: а) энергию, излучаемую системой за сутки; б) закон распределения температуры в оболочке; в) мощность тепловых потерь системы при условии, что теплопроводность оболочки меняется в зависимости от температуры по закону $\kappa = \kappa_0 [1 + b (T - T_1)]$.

§ 18. Электростатика

18.1. На окружности на равном расстоянии друг от друга расположены N одинаковых отрицательных зарядов. Какой заряд нужно поместить в центр окружности, чтобы система находилась в равновесии? Рассмотрите частные случаи, когда $N = 3$, $N = 4$.

18.2. Четыре маленьких заряженных шарика соединены тонкими нитями так, что при равновесии система образует ромб с острым углом α . Чему равно отношение зарядов соседних шариков?

18.3. На нитях одинаковой длины, закрепленных в одной точке, подвешены N маленьких одинаковых заряженных шариков плотностью ρ_1 . При равновесии системы в воздухе нити образуют с вертикалью угол α_1 , при погружении системы в жидкость плотностью ρ_0 этот угол становится равным α_2 . Определите диэлектрическую проницаемость жидкости.

18.4. Полусфера радиусом R , обращенная выпуклостью вверх, имеет заряд Q , равномерно распределенный по ее поверхности. Внутри полусферы, в ее вершине, закреплена легкая непроводящая нить длиной R , на конце которой находится маленький шарик с зарядом q и массой m . Пренебрегая действием силы тяжести, определите натяжение нити и период малых колебаний шарика.

18.5. Определите силу взаимодействия и вращающий момент, действующий на каждый из двух одинаковых диполей с электрическим моментом p , находящихся на расстоянии $r \gg l$ друг от друга (рис. 18.1).

18.6. Кольцо из тонкой проволоки разрывается, если на нем находится заряд q . Диаметр кольца и диаметр проволоки увеличили в 3 раза. При какой величине заряда разорвется кольцо?

18.7. Два точечных заряда $q_1 = 1$ ед. заряда СГС и $q_2 = -4$ ед. заряда СГС находятся в точках с координатами $(2, 0, 0)$ и $(-2, 0, 0)$ соответственно. Определите: величину и направление электрического поля в точке с координатами $(0, 3, 4)$; координаты точек, где поле отсутствует. Значения координат даны в сантиметрах.

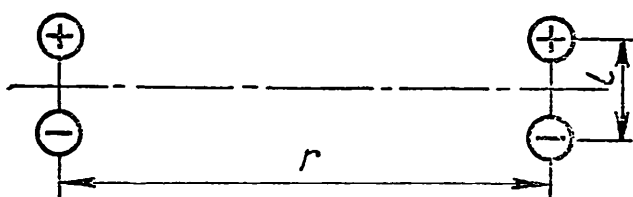


Рис. 18.1.

18.8. Две частицы массами m и M , имеющие заряды $-q$ и Q

соответственно, движутся как одно целое в однородном электрическом поле. Расстояние между частицами равно l . Определите напряженность электрического поля и ускорение частиц.

18.9. Конический маятник состоит из легкой непроводящей нити длиной l , на конце которой находится шарик массой m и зарядом q . На маятник наложено однородное электрическое поле с напряженностью E , направленное вертикально (горизонтально). Определите период обращения маятника и силу натяжения нити, если угол, образуемый нитью с ее равновесным положением, равен α .

18.10. Электрический диполь с моментом 10^{-10} Кл·м свободно установился в однородном электрическом поле напряженностью $9 \cdot 10^{-6}$ В/м. Диполь повернули на малый угол и предоставили самому себе. Какова частота собственных колебаний диполя в электрическом поле? Момент инерции диполя относительно оси, проходящей через центр диполя, равен $4 \cdot 10^{-12}$ кг·м².

18.11. Электрон, обладающий ничтожно малой скоростью, попадает в однородное электрическое поле, напряженность которого линейно возрастает со временем со скоростью $2,0 \cdot 10^9$ В/(м·с). Какую кинетическую энергию приобретет электрон, пройдя 1,0 м, если в начальный момент времени напряженность поля была равна нулю?

18.12. По тонкому проводу длиной $2l$ равномерно распределен заряд с линейной плотностью τ . а) Определите напряженность поля в точке A , удаленной от провода на расстояние a и лежащей на перпендикуляре, проведенном через середину (конец) провода. б) С какой силой поле будет действовать на диполь с электрическим моментом p , если его поместить в точку A ? Диполь расположен под углом α к проводу и лежит с ним в одной плоскости. в) Анализируя полученные результаты, рассмотрите случай, когда $l \rightarrow \infty$.

18.13. Тонкий стержень согнут в виде окружности радиусом 0,5 м так, что между его концами остался воздушный промежуток 0,02 м. По стержню равномерно распределен заряд $0,33 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определите напряженность поля: а) в центре окружности; б) в точке, лежащей на оси, перпендикулярной плоскости круга и удаленной от центра на расстояние R ; в) в середине воздушного промежутка.

18.14. Две бесконечные плоскости, несущие заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ , пересекаются под углом φ . Найдите напряженность поля, создаваемого плоскостями, и начертите картину силовых линий электрического поля.

18.15. Две параллельные металлические пластинки с площадью S каждая имеют заряды q_1 и q_2 . Пренебрегая краевыми эффектами, определите поверхностную плотность зарядов на пластинках.

18.16. Плоскопараллельная пластинка толщиной d имеет заряд, распределенный равномерно с объемной плотностью ρ_0 . Выбрав начало координат посередине пластинки и направив ось Ox перпендикулярно поверхности пластинки, установите закон изменения напряженности поля вдоль этой оси.

18.17. По тонкой пластинке, имеющей форму кольца с внутренним радиусом r и внешним R , равномерно распределен заряд q . Найдите напряженность поля на оси кольца в вакууме как функцию расстояния x от центра пластинки. Анализируя ответ, получите из него выражение для напряженности поля для случаев, когда: а) $r = 0$ (диск); б) $r = R$ — кольцо. Постройте график зависимости $E = f(x)$.

18.18. Оцените среднюю плотность электрических зарядов в земной атмосфере, если известно, что напряженность электрического поля на поверхности Земли 100 В/м , а на высоте $1,5 \text{ км}$ — 25 В/м .

18.19. В проводящем шаре имеются две сферические полости. В центре одной полости закреплен заряд q_1 , в центре другой — заряд q_2 . На большом расстоянии R от центра шара находится третий заряд q_3 . Определите силу, действующую на шар, полагая, что заряды лежат на одной прямой.

18.20. Легкий непроводящий стержень с небольшими шариками с массами m и M на концах, может вращаться без трения вокруг горизонтальной оси, отстоящей от шариков на расстояниях l и L . Шары обладают зарядами q и Q и находятся в однородном электрическом поле, направленном вертикально вверх. Сначала стержень удерживают в горизонтальном положении и затем отпускают. При каком значении напряженности поля система останется в равновесии? Какова скорость шарика массой M при прохождении стержнем вертикального положения, если напряженность электрического поля уменьшится вдвое?

18.21. Генератор Ван-де-Граафа состоит из двух изолированных разноименно заряженных сфер радиусом $0,3 \text{ м}$. Определите максимально достижимую разность потенциалов между сферами, если критическая напряженность электрического поля в воздухе, при которой начинается коронный разряд с поверхности сферы, составляет 3 МВ/м . Расстояние между центрами шаров 3 м . Заряд распределен по сферам равномерно.

18.22. Внутри шарового металлического слоя, внутренний и внешний радиусы которого равны r и R , на расстоянии $l < r$ от центра находится точечный заряд q . Найдите потенциал поля в центре шара. Как изменится этот потенциал, если слой заземлить?

18.23. Внутри шара радиусом R , заряженного с постоянной объемной плотностью ρ , имеется сферическая полость радиусом r , в которой заряды отсутствуют. Центр полости смещен относительно центра шара на расстояние l . Найдите напряженность E и потенциал ϕ поля внутри полости, внутри шара и за его пределами как функцию расстояния x , отсчитываемого от центра шара.

18.24. На расстоянии R от центра металлического заземленного шара радиусом $r < R$ помещен точечный заряд q . С какой силой взаимодействуют шар и заряд? Чему равна эта сила, если: а) шар не заземлен; б) на шаре находится заряд Q ?

18.25. В однородное электрическое поле напряженностью E помещен металлический шар радиусом r . а) Определите потенциал

внутри шара и в точках поля, удаленных от центра шара на расстояние $R > r$. б) Какова плотность индуцированных зарядов? в) С какой силой отталкиваются друг от друга половины шара, разделенные плоскостью, перпендикулярной полю?

18.26. Тонкий диск радиусом r имеет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ . Чему равна разность потенциалов между центром и краем диска?

18.27. Три пластинки расположены параллельно друг другу. Расстояния от средней пластинки до крайних d и $2d$. На первой пластинке равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью σ , на второй — 2σ , на третьей 3σ . Между пластинками находятся диэлектрики с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и ϵ_2 . Определите разность потенциалов между пластинками. Как изменится ответ, если среднюю пластинку заземлить?

18.28. Определите разность потенциалов, возникающую между вершиной и основанием Эйфелевой башни вследствие вращения Земли. Широта Парижа 45° , высота Эйфелевой башни 350 м.

18.29. Молекулу воды можно рассматривать как диполь, электрический момент которого $6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Полагая, что диполь составлен положительным и отрицательным зарядами, равными по величине $8e$, оцените электростатическую энергию, которой обладают молекулы в стакане воды ($V = 250$ см³).

18.30. Четыре проводящих шара радиусом r расположены в вершинах тетраэдра с ребром $l \gg r$. Одному из шаров сообщили заряд q и затем его на некоторое время поочередно соединяли с каждым из незаряженных шаров. Чему равно изменение потенциальной энергии системы при перераспределении зарядов? Объясните, за счет чего произошло изменение энергии.

18.31. Восемь протонов находятся в вершинах куба с ребром l . Какова будет максимальная скорость частиц, если их предоставить самим себе?

18.32. Мыльный пузырь, сообщающийся с атмосферой, имеет заряд q . Определите радиус пузыря, если коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора σ . Решите задачу двумя способами: энергетическим и электростатическим.

18.33. Электрон с кинетической энергией $W = 10$ кэВ влетает в плоский горизонтально расположенный конденсатор, расстояние между обкладками которого $d = 1$ см, а длины пластин $l = 10$ см. На расстоянии $L = 20$ см от конденсатора находится экран. Начальная скорость электрона направлена параллельно пластинам. Найдите смещение электрона на экране, если: а) на пластины подано постоянное напряжение $U = 40$ В; б) напряжение возрастает по закону $U = kt$ и электрон попадает в конденсатор в тот момент, когда $U = 0$.

18.34. Две альфа-частицы летят из бесконечности навстречу друг другу. Их скорости v_1 и $v_2 > v_1$. На какое минимальное расстояние x сблизятся частицы и как они будут двигаться после этого? Каковы установившиеся скорости частиц?

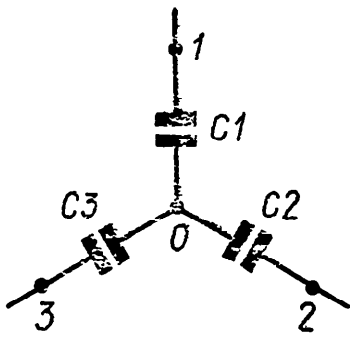


Рис. 18.2.

18.35. Электроды лампы имеют форму нити радиусом $r = 0,10$ мм (катод) и коаксиального с ней цилиндра радиусом $R = 2,72$ мм (анод). На электроды подано напряжение $U = 100$ В. Катод эмиттирует электроны с ничтожно малыми скоростями. а) По какому закону изменяется напряженность поля между электродами в радиальном направлении? б) Каковы максимальные значения скорости и ускорения электронов? в) Полагая, что вся лампа находится при достаточно высокой температуре T

и электроны, испускаемые нагретым металлом, образуют разреженный газ, найдите закон изменения концентрации электронов в радиальном направлении.

18.36. Оцените емкость тонкого уединенного проводящего диска радиусом $0,1$ м.

18.37. Найдите емкость конденсатора, состоящего из двух шаров радиусами r , находящихся в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ . Расстояние между центрами шаров $R \gg r$. При решении считать, что заряды на поверхности шаров распределены равномерно.

18.38. Найдите электроемкость единицы длины двух проводов, расположенных в воздухе параллельно друг другу. Радиус проводов r , расстояние между их осями $l \gg r$.

18.39. Между пластинами плоского конденсатора находится диэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого изменяется в направлении, перпендикулярном к пластинам, по линейному закону от $\epsilon_1 = 2$ вблизи одной до $\epsilon_2 = 5$ вблизи другой. Расстояние между пластинами конденсатора $8,85 \cdot 10^{-3}$ м, площадь пластины $5 \cdot 10^{-4}$ м². а) Определите электроемкость конденсатора. б) Какова средняя объемная плотность связанных зарядов, возникающих внутри диэлектрика, если напряжение на конденсаторе $88,5$ В?

18.40. В некоторой цепи имеется участок, содержащий конденсаторы, показанные на рисунке 18.2. Потенциалы точек 1 , 2 и 3 равны φ_1 , φ_2 и φ_3 . Определите потенциал точки 0 .

18.41. Определите емкость системы конденсаторов, соединенных между собой, как указано на рисунке 18.3, а, б, в и г.

18.42. Определите емкость системы, состоящей из двух концентрических сфер радиусами r и R , пространство между которыми наполовину залито жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ . Искривлением поля на горизонтальной поверхности диэлектрика пренебречь.

18.43. Найдите заряды на конденсаторах в схемах, указанных на рисунке 18.4, а и б.

18.44. Конденсатор емкости C_1 заряжен до разности потенциалов U_0 и отключен от батареи. К этому конденсатору подключили незаряженный конденсатор емкостью C_2 , а затем, отключив его, соединили между собой обкладки конденсаторов, имеющие противо-

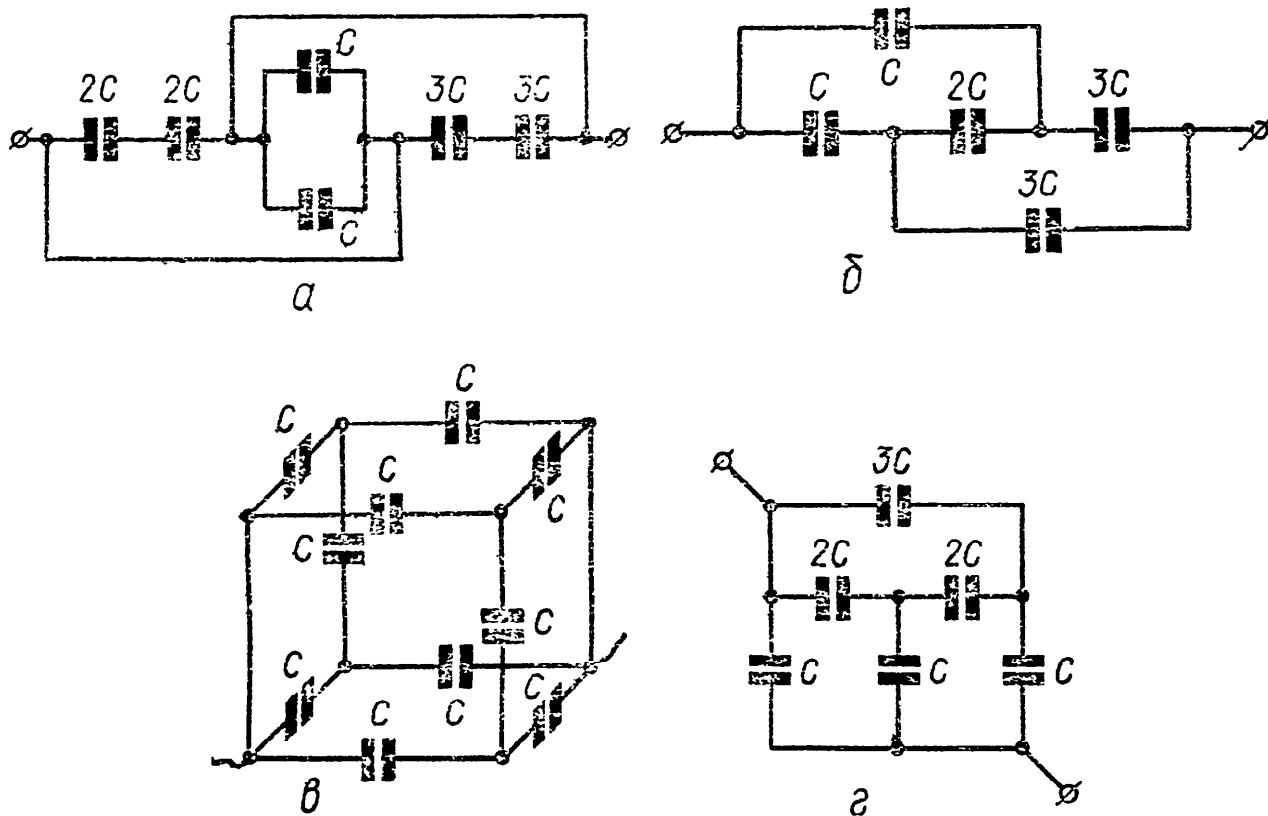


Рис. 18.3.

положные по знаку заряды. Определите установившуюся разность потенциалов на первом конденсаторе.

18.45. Два конденсатора емкостью C_1 и C_2 поочередно подключили к источнику постоянного напряжения и затем отключили. После этого электростатический вольтметр подключили сначала к первому конденсатору, а затем ко второму. Показания вольтметра оказались равными U_1 и U_2 . а) Каково начальное напряжение на конденсаторах? б) Чему равна емкость C_3 вольтметра?

18.46. В схеме, указанной на рисунке 18.5, найдите: разность потенциалов между средними пластинами; отношение поверхностных зарядов, находящихся на этих пластинах.

18.47. Четыре одинаковые металлические пластины установлены параллельно друг другу (рис. 18.6). Пластину 2 соединяют с точкой, имеющей постоянный потенциал 1 кВ, затем ее отключают,

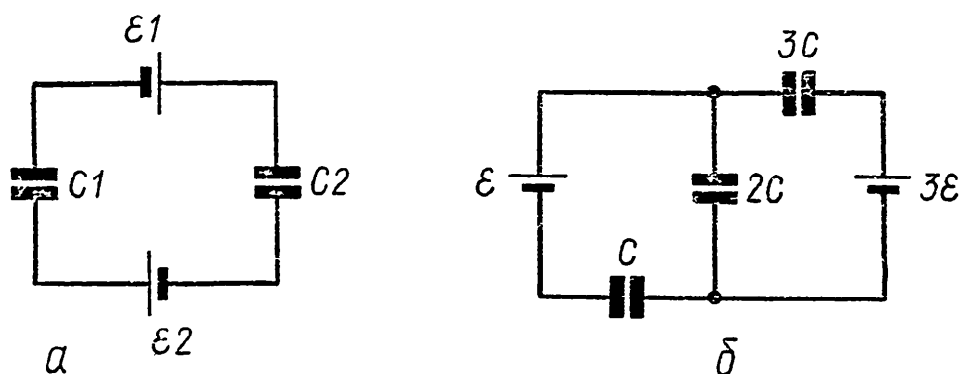


Рис 18.4.

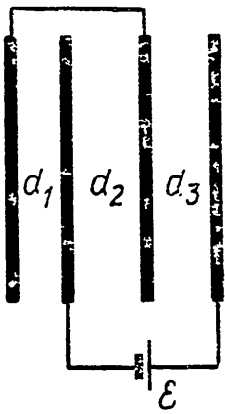


Рис. 18.5.

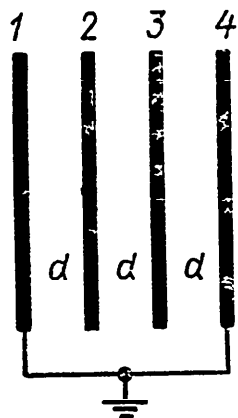


Рис. 18.6.

а пластину 3 соединяют с точкой, имеющей постоянный потенциал 2 кВ. Определите потенциал пластины 2.

18.48. Какой заряд пройдет через сечения 1, 2, 3 в схеме, представленной на рисунке 18.7, а, если, отключив аккумулятор, замкнуть ключ K_2 ? Какой заряд пройдет через сечения 1, 2, если замкнуть ключ K в схеме рисунка 18.7, б?

18.49. Двум металлическим шарам радиусами R_1 и R_2 , соединенным тонким длинным проводником, сообщен заряд q_0 . Какой заряд пройдет по соединительному проводнику, если: а) второй шар поместить внутрь заземленной проводящей сферы радиусом R_3 ; б) ко второму шару подключить заземленный конденсатор, емкость которого численно равна R_3 ?

18.50. Точечный заряд $3 \cdot 10^{-6}$ Кл помещен в центре шарового слоя из однородного изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью, равной 2. Внутренний радиус слоя 0,10 м, внешний — 0,20 м. а) Чему равна энергия электрического поля точечного заряда в диэлектрике? б) Как изменится ответ, если шаровой слой будет металлическим; вместо шарового слоя поместить две проводящие концентрические сферы тех же радиусов? в) Каков будет ответ, если заземлить внутреннюю сферу; внешнюю?

18.51. Ядро тяжелых атомов в первом приближении можно считать сферой с постоянной объемной плотностью заряда $\frac{4}{3} \cdot 10^{25}$ Кл/м³. Чему равно изменение электрической энергии при расщеплении всех ядер одного грамм-атома урана на два одинаковых осколка, которые после расщепления разлетаются на большое расстояние друг от друга?

18.52. Вычислите энергию цилиндрического конденсатора, на котором находится заряд q . Длина конденсатора l , радиусы обкладок R и $2R$. Между обкладками находятся два коаксиальных слоя однородных диэлектриков с проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Границей

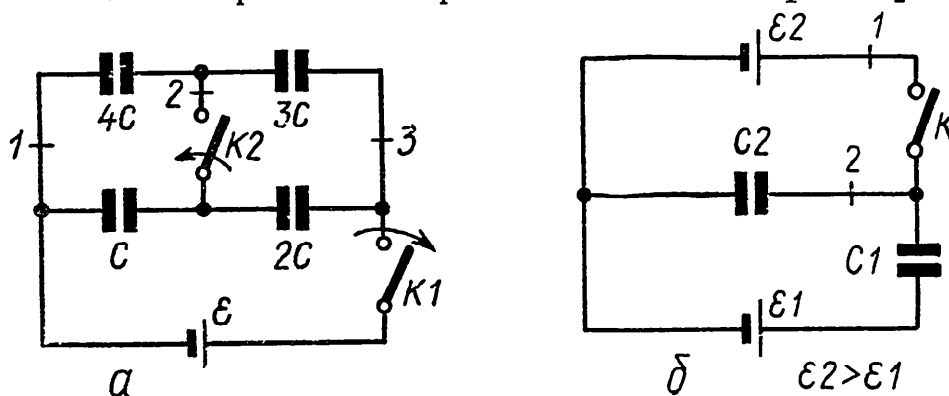


Рис. 18.7.

раздела диэлектриков служит цилиндрическая поверхность радиусами $1,5 R$. Краевыми эффектами пренебречь. Решите задачу при условии, что проницаемость диэлектрика между цилиндрами меняется линейно от ϵ_1 до ϵ_2 .

18.53. Два воздушных конденсатора емкостью C_1 и C_2 заряжают поочередно от источника с напряжением U . В первый конденсатор вставляют диэлектрик с проницаемостью ϵ и после этого конденсаторы соединяют: один раз одноименно заряженными пластинками, второй — заряженными разноименно. Какая работа совершена при перезарядке конденсаторов? На что идет эта работа?

18.54. Какое количество теплоты выделится в цепи, изображенной на рисунке 18.8, *a* и *б*, при переключении ключа из положения 1 в положение 2?

18.55. Между обкладками плоского воздушного конденсатора находится изолированная металлическая пластинка толщиной d , параллельная обкладкам конденсатора. Площадь каждой обкладки и пластинки S , расстояние между обкладками $2d$. Какую работу нужно совершить, чтобы вынуть пластинку из конденсатора, если конденсатор: а) имеет заряд q и отключен от источника; б) подключен к аккумулятору с э. д. с. \mathcal{E} ? Решите задачу при условии, что между обкладками находилась стеклянная пластинка с проницаемостью $\epsilon = 5$, причем $q = 2,97 \cdot 10^{-6}$ Кл, $d = 10^{-3}$ м, $S = 10^{-4}$ м², $\mathcal{E} = 200$ В.

18.56. Плоский конденсатор состоит из двух одинаковых пластин площадью $6,25 \cdot 10^{-2}$ м², подключенных к источнику постоянного напряжения так, что их потенциалы относительно земли все время равны $+5$ и -5 кВ. Расстояние между пластинами $2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Посередине между обкладками конденсатора параллельно им устанавливается тонкая металлическая пластинка, соединенная с землей. Какую работу нужно совершить, чтобы передвинуть эту пластинку на расстояние $5 \cdot 10^{-3}$ м к одной из обкладок?

18.57. Стеклянный цилиндр диаметром d и длиной l зажат торцами между обкладками плоского конденсатора. Обкладки конденсатора представляют собой диски диаметром $2d$. Какое напряжение можно подать на конденсатор, чтобы не раздавить стекло, если разрушающая нагрузка при сжатии стекла равна σ ? Диэлектрическая проницаемость стекла ϵ .

18.58. Две прямоугольные пластинки длиной a и шириной b расположены параллельно друг другу на расстоянии d . Пластины подключили к источнику с постоянным напряжением и затем от-

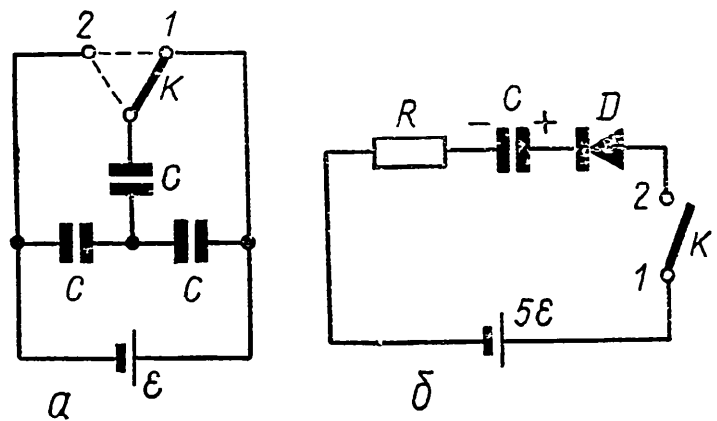


Рис. 18.8.

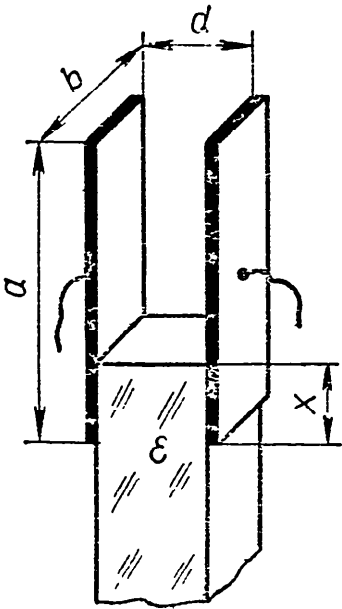


Рис. 18.9.

ключили. В пространстве между пластинками вставили диэлектрик с электрической проницаемостью ϵ , как указано на рисунке 18.9. Определите результирующую силу, действующую на диэлектрик со стороны поля, в зависимости от расстояния x . Решите задачу при условии, что конденсатор не отключен от источника напряжения.

18.59. Две коаксиальные трубки радиусами r и R погружаются вертикально в масло плотностью ρ и диэлектрической проницаемостью ϵ . Между трубками поддерживается постоянная разность потенциалов U . На какую высоту поднимается масло между трубками?

18.60. Конденсатор переменной емкости состоит из двух параллельных металлических пластин в форме полукруга радиусом R , отстоящих на расстоянии d друг от друга (рис. 18.10). На конденсатор подали напряжение U и затем его отключили. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть пластины относительно друг друга на угол φ ? Решите задачу при условии, что источник напряжения не отключали от конденсатора.

18.61. Два точечных заряда q_1 и q_2 находятся на расстоянии l друг от друга. Во сколько раз изменится сила, действующая на заряды, если посередине между ними поместить достаточно большую металлическую заземленную пластину толщиной $d < l$?

18.62. Две взаимно перпендикулярные металлические пластины, спаянные между собой, образуют двугранный угол. Точечный заряд q находится на расстоянии d от каждой пластины. Определите силу, действующую на заряд q .

18.63. Заряд q расположен на высоте h над проводящей плоскостью. Какую работу нужно совершить против сил поля, чтобы удалить этот заряд в бесконечность?

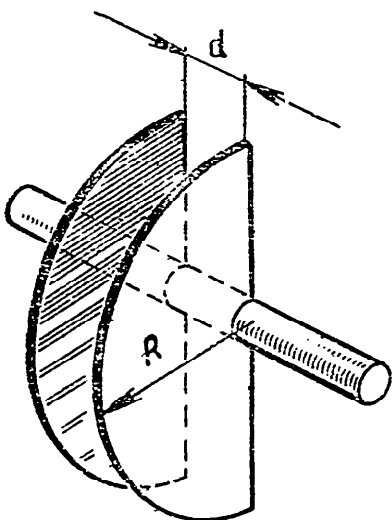


Рис. 18.10.

18.64. Маленький шарик массой m и радиусом r имеет заряд q . Шарик подвешен на длинной нити над горизонтальной металлической плоскостью. Высота точки подвеса $2l$, длина нити $l \gg r$. Нить отклонили в горизонтальное положение и отпустили. а) Чему равно максимальное натяжение нити при движении шарика? б) Определите круговую частоту малых колебаний шарика около положения равновесия.

18.65. Прямой провод, по которому равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$ Кл/м, натянут парал-

тельно земной поверхности на высоте 5 м. а) Чему равна напряженность поля у поверхности земли под проводом? б) Какая электрическая сила действует на каждый метр провода?

18.66. Тонкое кольцо радиусом R , по которому равномерно распределен заряд q , расположено параллельно большой проводящей плоскости на расстоянии l от нее. Определите напряженность и потенциал электрического поля в центре кольца.

18.67. Определите емкость системы, состоящей из металлического шарика радиусом r и большой заземленной проводящей пластины, находящейся от центра шара на расстоянии R . При расчете считать, что заряд шарика распределен по его поверхности равномерно, пространство между шариком и плоскостью заполнено однородным диэлектриком с проницаемостью ϵ .

§ 19. Постоянный ток

19.1. В электростатическом генераторе Ван-де-Граафа резиновая лента шириной 0,30 м движется со скоростью 20 м/с. Около нижнего шкива ленте сообщается поверхностный заряд такой величины, что по обеим сторонам ленты образуется электрическое поле с напряженностью 1200 кВ/м. Чему равен ток, обусловленный механическим перемещением заряда?

19.2. Угольный стержень соединен последовательно с железным стержнем такой же толщины. При каком соотношении между длинами стержней их общее сопротивление не зависит от температуры?

19.3. Цилиндрический проводник длиной l и сечением S изготовлен из материала, у которого удельное сопротивление изменяется вдоль проводника по закону $\rho = \rho_0 + \rho_1 \frac{x}{l}$. К проводнику приложено напряжение U . Чему равен ток, идущий в проводнике? По какому закону изменяется напряженность электрического поля в проводнике?

19.4. Два металлических шара диаметром 0,30 м опущены на изолированных кабелях в океан на большую глубину. Расстояние между центрами шаров 300,0 м. Удельная электропроводность морской воды 4 См/м.

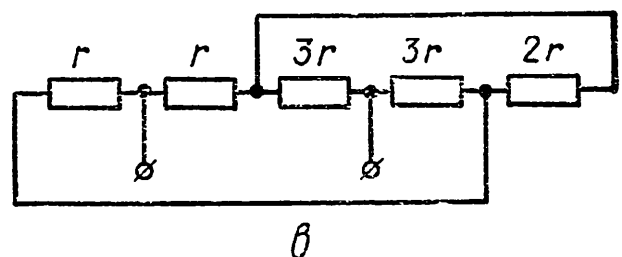
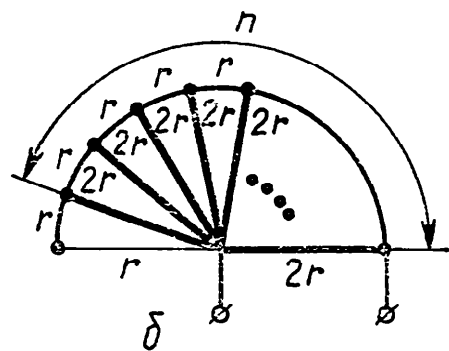
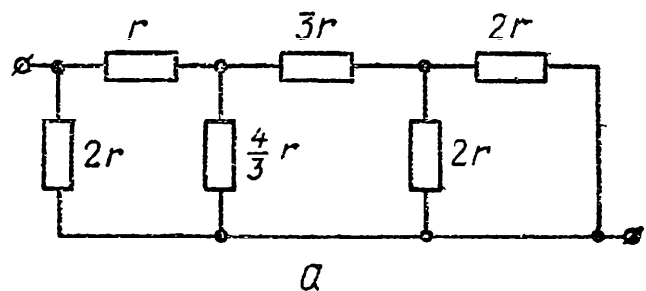


Рис. 19.1.

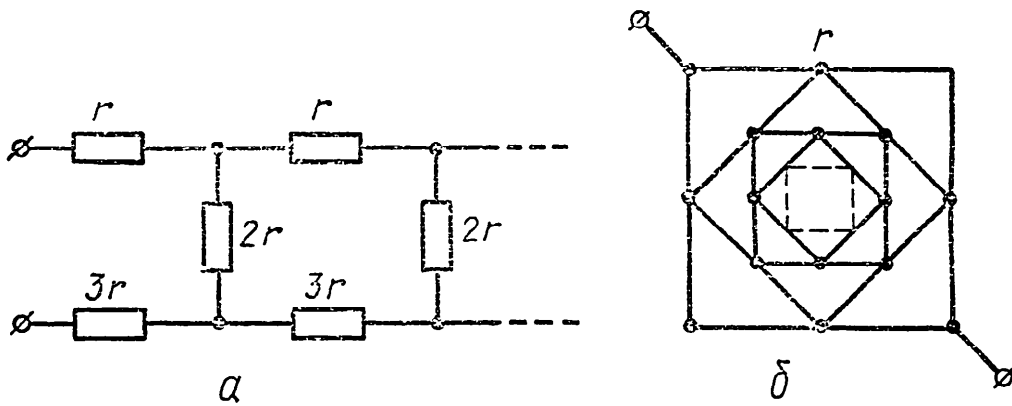


Рис. 19.2.

Оцените сопротивление цепи при подключении источника к концам кабелей оставшихся на поверхности воды. Сопротивлением кабелей пренебречь.

19.5. Определите сопротивление цепей, представленных на рисунке 19.1, а, б и в.

19.6. Контур, изображенный на рисунке 19.2, а и б, состоит из бесконечно большого числа: одинаковых звеньев, включающих в себя три сопротивления r , $2r$ и $3r$; квадратов, изготовленных из однородной проволоки и вписанных в квадрат, сопротивление стороны которого r . Определите сопротивление контура.

19.7. Из однородной проволоки сделан каркас в форме: а) тетраэдра; б) октаэдра; в) куба; г) звезды (рис. 19.3). Сопротивление ребра каждого каркаса и звена звезды, указанной на рисунке, равно r . Какое сопротивление покажет омметр, если его подключать к различным узлам каркасов?

19.8. Двумерная бесконечная сетка с квадратными ячейками составлена из одинаковых сопротивлений r . В каждом узле сетки соединяются концы четырех сопротивлений. Каково показание омметра, если его подключить к концам одного из сопротивлений.

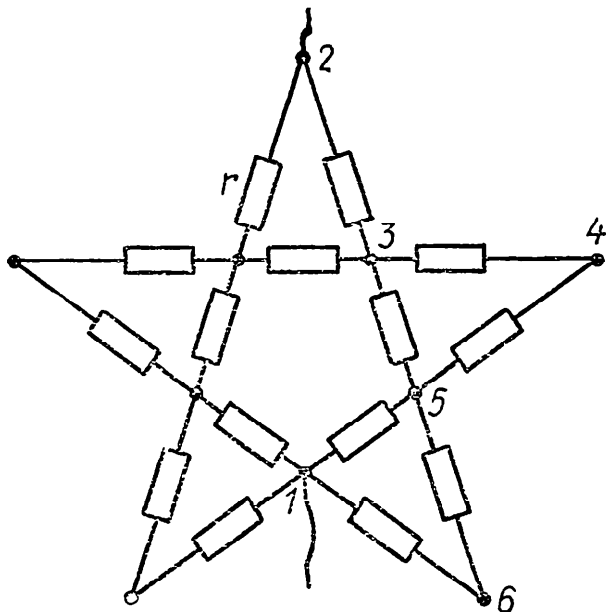


Рис. 19.3.

19.9. Пространство между двумя тонкими медными коаксиальными трубками заполнено графитом с удельным сопротивлением ρ . Диаметр трубок d_1 и $d_2 > d_1$, длина l . Чему равно сопротивление системы при подключении ее к концам трубок?

19.10. Диэлектрик плоского конденсатора состоит из двух проводящих слоев с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 и удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 . Толщина первого слоя d_1 , второго d_2 , емкость конденсатора C , на конденсатор подано напряжение U . Определите:

а) ток утечки в диэлектрике;
 б) напряженность поля в слоях диэлектрика; в) плотность свободных и связанных зарядов на границе раздела слоев.

19.11. Пространство между обкладками сферического конденсатора, диаметры которых равны d и D , заполнено однородным изотропным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ и удельным сопротивлением ρ .

Сначала конденсатор не заряжен, затем внутренней обкладке сообщается заряд q_0 . а) По какому закону изменяется заряд на этой обкладке вследствие стекания заряда? б) Сколько теплоты выделится в конденсаторе за время движения зарядов?

19.12. В схеме, указанной на рисунке 19.4, найдите ток в гальванометре. Сопротивлением гальванометра пренебречь.

19.13. Сопротивление гальванометра можно определить методом шунтирования. Для этого гальванометр включают в цепь источника последовательно с магазином сопротивлений и отмечают показания гальванометра. Затем гальванометр шунтируют переменным сопротивлением i , изменяя сопротивление шунта и магазина, добиваются прежнего показания гальванометра. Зная сопротивления магазина R_1 и R_2 и сопротивление шунта r , найдите сопротивление гальванометра.

19.14. Если к вольтметру присоединить некоторое добавочное сопротивление, пределы измерения прибора возрастают в m раз. Другое добавочное сопротивление увеличивает пределы измерения в n раз. Во сколько раз увеличится предел измерения вольтметра, если оба эти сопротивления соединить между собой параллельно и затем подключить к вольтметру последовательно.

19.15. К амперметру A подсоединены два шунта по схеме, представленной на рисунке 19.5. Шкала амперметра содержит 100 делений. Если амперметр включать в цепь, пользуясь клеммами 1—2, цена деления шкалы амперметра оказывается равной 0,01 А/дел, если пользоваться клеммами 2—3 цена деления равна

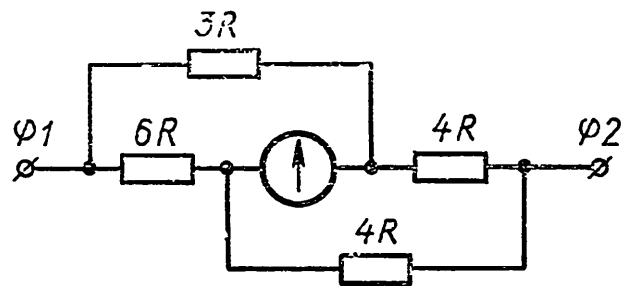


Рис. 19.4.

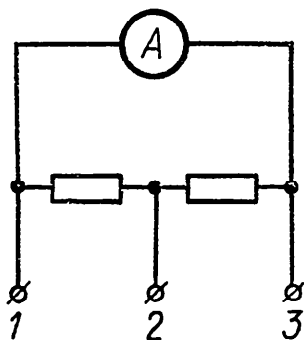


Рис. 19.5.

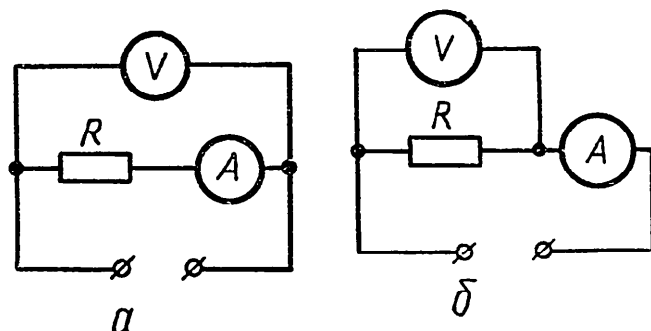


Рис. 19.6.

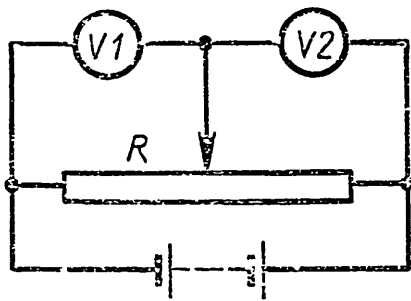


Рис. 19.7.

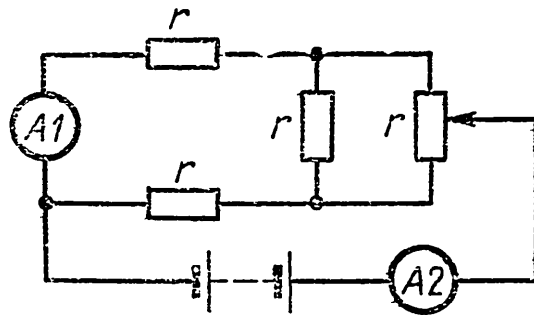


Рис. 19.8.

0,02 А/дел. Какой ток можно измерять амперметром, подключив его клеммами 1—3?

19.16. Если источник тока подключить по схеме рисунка 19.6, а, показания амперметра и вольтметра равны I_1 и U_1 . Если же вольтметр подключить по схеме 19.6, б, то показание амперметра станет равным I_2 . Каковы показания приборов, если во второй схеме поменять местами источник и вольтметр? Сопротивлением источника пренебречь.

19.17. Если к аккумулятору подключить последовательно амперметр и вольтметр, то они показывают соответственно 0,1 А и 10 В. Если приборы соединить параллельно и подключить к источнику, то их показания равны 1 А и 1 В. Определите э. д. с. и внутреннее сопротивление аккумулятора.

19.18. При подключении к источнику тока двух вольтметров, соединенных последовательно, показания их равны 6 и 3 В. При подключении к источнику только первого вольтметра его показание равно 8 В. Чему равна э. д. с. источника?

19.19. Аккумулятор замкнут на некоторое сопротивление. Если в цепь включить два амперметра, соединенных между собой параллельно, они показывают токи 2 и 3 А. Если амперметры включить в цепь последовательно, они показывают ток 4 А. Какой ток течет в цепи при отсутствии приборов?

19.20. В схеме, указанной на рисунке 19.7, сопротивления вольтметров 2 и 3 кОм, сопротивление потенциометра и источника 0,5 и 0,1 кОм. При каком соотношении плеч потенциометра $U_1 = 2U_2$?

19.21. При каком положении движка потенциометра в схеме, указанной на рисунке 19.8, показания амперметров будут наибольшими (наименьшими)? Чему равны эти показания? Сопротивлением источника пренебречь.

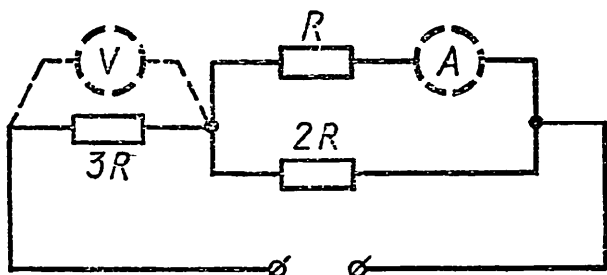


Рис. 19.9.

19.22. На рисунке 19.9 показана схема электрической цепи, состоящей из трех известных сопротивлений R , $2R$, $3R$ и источника тока. Каким должно быть внутреннее сопротивление: а) амперметра, включенного в ветвь меньшего сопротивления, чтобы

погрешность измерений тока в этом сопротивлении не превышала $z\%$; б) вольтметра, чтобы при подключении его к большему сопротивлению погрешность измерений не превышала $z\%$?

19.23. На рисунке 19.10 показана схема, состоящая из трех сопротивлений R_1 , R_2 , $R_3 = R_2$ и нагрузки сопротивлением r . Если на сопротивление R_1 подать напряжение $U_1 = 120$ В, то через нагрузку идет ток $I = 2$ А, а на сопротивлении R_3 напряжение оказывается равным $U_2 = 30$ В. Если напряжение U_1 подать на нагрузку, то с сопротивления R_1 можно снять напряжение $U_3 = 20$ В. Определите величину сопротивлений, входящих в контур.

19.24. На вход схемы, указанной на рисунке 19.11, подаются прямоугольные импульсы напряжения U_0 с длительностью каждого импульса τ . Период повторения импульсов T . Полагая, что в течение одного периода напряжение на конденсаторе изменяется очень мало, определите напряжение, которое установится на конденсаторе.

19.25. На сколько изменится ток через гальванометр в схеме, указанной на рисунке 19.12, если одно из сопротивлений увеличить вдвое? Сопротивлением источника и гальванометра пренебречь. Как изменится ответ, если гальванометр и батарею поменять местами?

19.26. С каким температурным коэффициентом сопротивления нужно взять проволоку для катушки катушки «термометра сопротивления», чтобы, используя участок одномерного реохорда моста Уитстона от 400 до 600 мм, можно было измерять температуру проволоки в интервале от 0 до 250°C ?

19.27. Полностью разряженный аккумулятор емкостью 60 А·ч должен заряжаться до полной зарядки от источника с напряжением 8 В в течение 50 ч. Внутреннее сопротивление аккумулятора 1 Ом. а) Определите э. д. с. аккумулятора. б) Сколько времени нужно заряжать этот аккумулятор синусоидальным током от двухполупериодного выпрямителя, если тепловой амперметр, включенный в цепь аккумулятора, показывает ток 5 А? При расчете считать, что на зарядку идет весь ток, проходящий через аккумулятор.

19.28. При какой величине сопротивления R в цепи, изображенной на рисунке 19.13, возникнет дуговой разряд при размыкании рубильника? Известно, что напряжение на участке разряда свя-

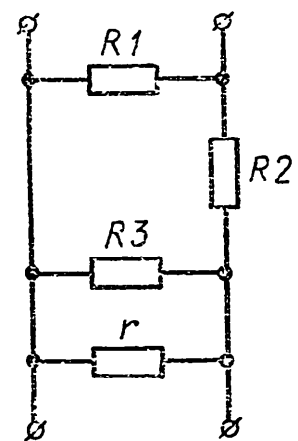


Рис. 19.10.

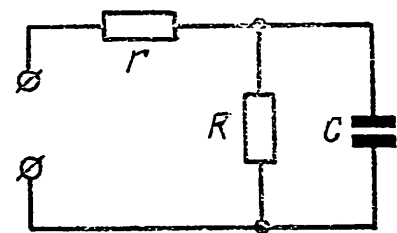


Рис. 19.11.

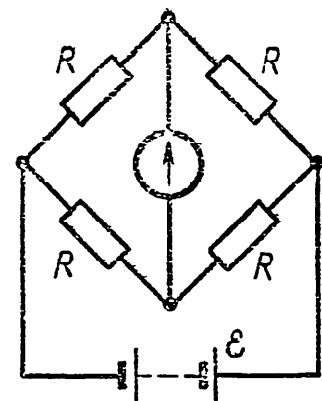


Рис. 19.12.

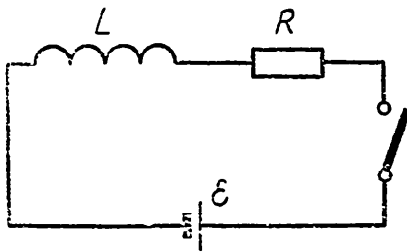


Рис. 19.13.

зано с током в цепи формулой $U = U_0 + aI$ (где $U_0 = 10$ В, $a = 100$ В·А), э. д. с. батареи $\mathcal{E} = 100$ В. Считать, что все сопротивление цепи сосредоточено в R .

19.29. Два элемента соединены, как указано на рисунке 19.14. Если электростатический вольтметр подключить к точкам 1—3 и 2—4, то его показания при разомкнутом ключе оказываются равными соответственно 1,8 и 1,6 В. Если замкнуть ключ, то при подключении вольтметра к точкам 1—3 его показание равно 1,75 В. Что будет показывать вольтметр при замкнутом ключе, если изменить полярность второго источника?

19.30. Вольтметр, подключенный к аккумулятору, показал напряжение U_1 , тот же вольтметр, присоединенный к двум таким аккумуляторам, соединенным последовательно, показал напряжение U_2 . Что покажет вольтметр, если его подключить к трем источникам, соединенным последовательно разноименными полюсами? Решите задачу при условии, что источники соединяли параллельно.

19.31. Батарея из n элементов, каждый из которых имеет э. д. с. \mathcal{E} и внутреннее сопротивление r , должна давать ток на внешнее сопротивление R . Нужно составить смешанную батарею из такого числа k параллельных групп, содержащих по m последовательно соединенных элементов, чтобы получить максимальный ток. Определите число групп и число элементов в группе. Решите задачу при условии, что элементы в каждой группе соединены параллельно, а сами группы — последовательно.

19.32. Имеется несколько одинаковых гальванических элементов с внутренним сопротивлением 2,4 Ом каждый. Если все элементы соединить последовательно и замкнуть батарею на сопротивление 12 Ом, то по цепи пойдет ток 0,44 А. Если соединить элементы параллельно, то через это же сопротивление пойдет ток 0,123 А. Какой максимальный ток можно получить во внешней цепи, имея эти элементы?

19.33. Определите силу тока через гальванометр в схемах, указанных на рисунке 19.15, а и б, показания электростатического вольтметра и потенциал точки А относительно точки В в схемах б, в и г ($\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$) Сопротивлением гальванометров пренебречь.

19.34. Три гальванических элемента с э. д. с. $\mathcal{E}_1 = 1,3$, $\mathcal{E}_2 = 1,4$ и $\mathcal{E}_3 = 1,5$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,1$, $r_2 = 0,2$ и $r_3 = 0,3$ Ом вместе с сопротивлением $R = \frac{104}{110}$ Ом образуют электрическую цепь, указанную на рисунке 19.16. Определите: а) токи, идущие через сопротивление R и первый источник; б) ток в первом элементе при коротком замыкании сопротивления R .

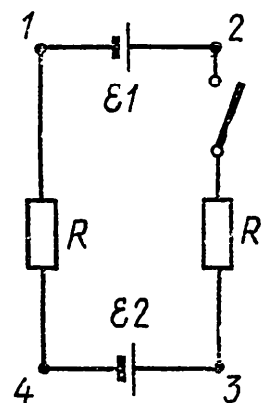


Рис. 19.14.

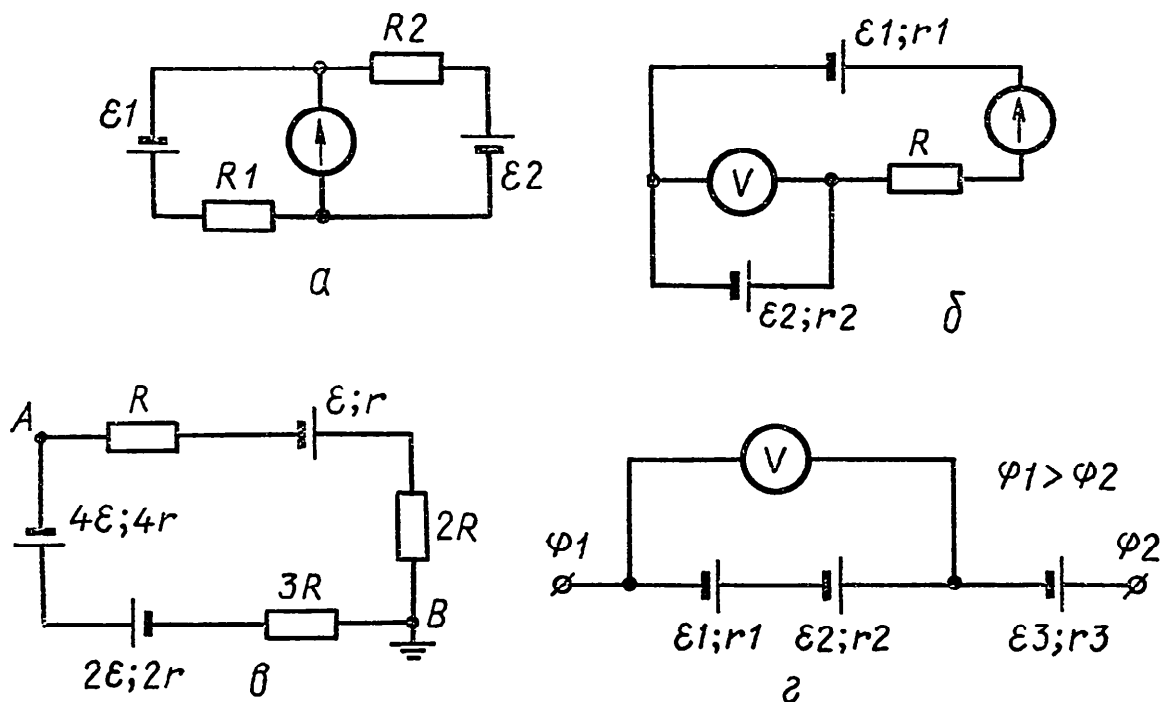


Рис. 19.15.

19.35. Элементы схемы, изображенной на рисунке 19.17, имеют следующие значения: $\mathcal{E}_1 = 1$, $\mathcal{E}_2 = 2$ и $\mathcal{E}_3 = 3$ В; $R_1 = 100$, $R_2 = 200$, $R_3 = 300$ и $R_4 = 400$ Ом. Определите токи, идущие через сопротивления. Сопротивлением источников и соединительных проводов пренебречь.

19.36. Треугольная пирамида сделана из проволочек, сопротивлением которых можно пренебречь. В ребра пирамиды подключены источники тока и два сопротивления (рис. 19.18). Определите разность потенциалов между точками O и B и ток, идущий по участку AB .

19.37. Определите заряды на обкладках конденсаторов в схемах, представленных на рисунке 19.19, a , b , $в$, $г$ и $д$. В схеме b $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, в схеме $в$ $\varphi_1 > \varphi_2$.

19.38. На участке цепи сопротивлением 5 Ом ток изменяется с течением времени по закону: а) $I = 2 + 0,5t$; б) $I = k\sqrt{t}$, где $k = 2$ А·с^{1/2}; в) $I = 5 \sin^2 100\pi t$. Определите работу тока за 10 с. Решите задачу при условии, что напряжение на участке меняется по закону $U = k\sqrt{t}$.

19.39. Нужно передать мощность 100 кВт на расстояние 7,5 км, причем потери на нагревание проводов не должны превышать 3% передаваемой энергии. Напряжение на входе линии 2 кВ. Определите массу медных проводов. Как изменится необходимое количество меди, если по-

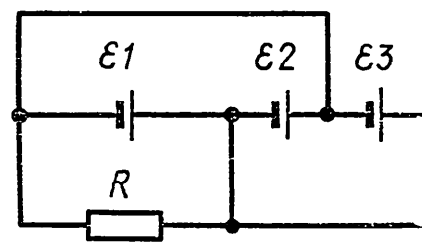


Рис. 19.16.

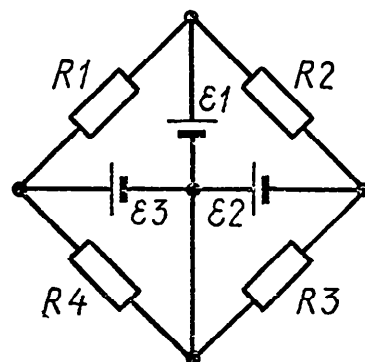


Рис. 19.17.

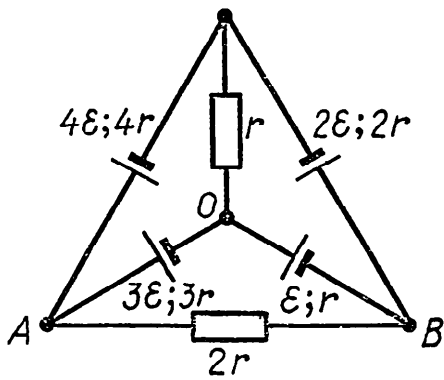


Рис. 19.18.

даваемое напряжение увеличить в 3 раза?

19.40. При включении в сеть плитки номинальной мощностью 300 Вт, рассчитанной на напряжение сети, фактически каждую секунду выделяется энергия 250 Дж. Какая энергия выделяется в двух таких плитках, включенных в сеть: а) параллельно; б) последовательно?

19.41. Из однородной проволоки длиной l сделано кольцо. Единица длины провода имеет сопротивление ρ . Один провод от источника с э. д. с. \mathcal{E} и внутренним сопротивлением $\frac{\rho l}{2}$ припаян к кольцу, второй может скользить по нему без нарушения контакта. Как изменяется энергия, выделяемая каждую секунду в кольце, в зависимости от положения скользящего контакта?

19.42. Каждая пара из n точек соединена между собой сопротивлением R . Какая энергия будет выделяться во внешнем участке цепи, если вместо одного из сопротивлений подключить источник с э. д. с. \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r ?

19.43. При силе тока 5 А внешняя цепь источника потребляет мощность 9,5 Вт, если же сопротивление внешней цепи 0,225 Ом, то потребляемая мощность 14,4 Вт. Найдите максимальную энергию, которая будет выделяться во внешней цепи. Чему будет равен при этом к. п. д. источника?

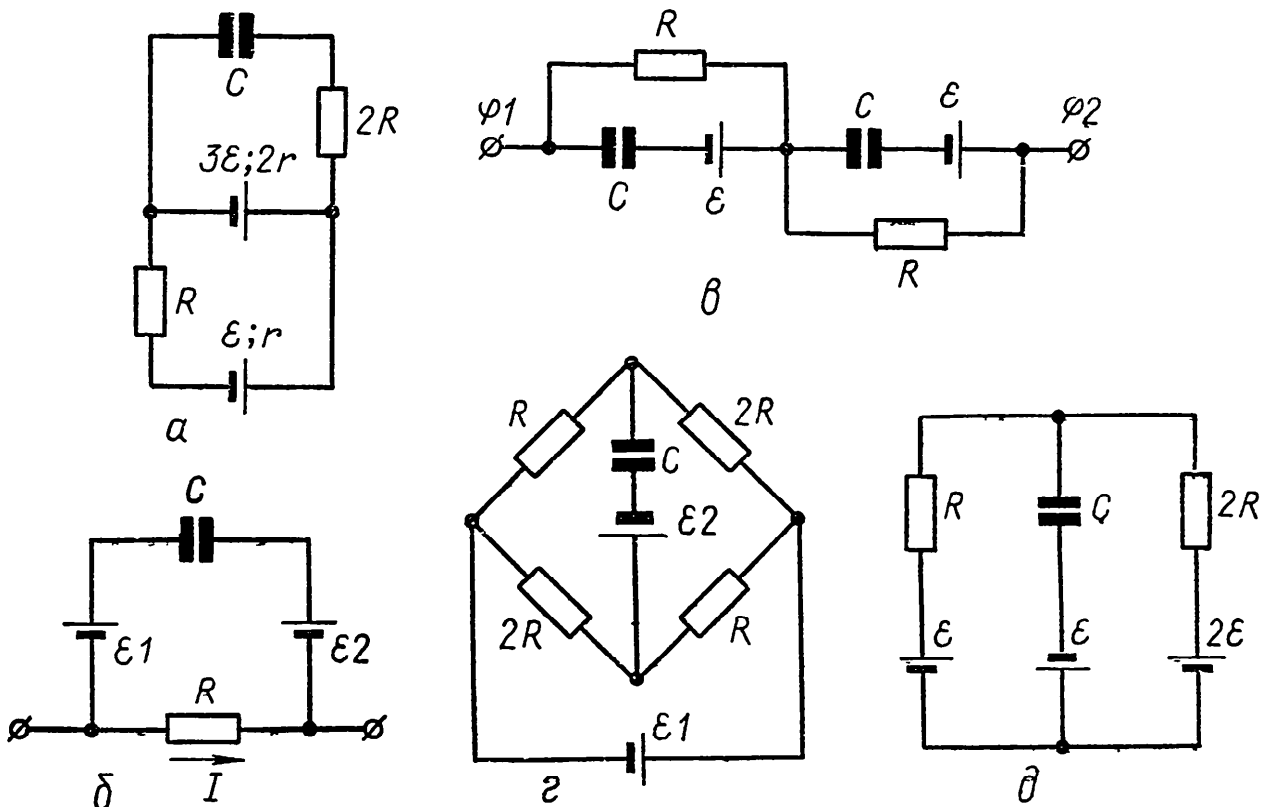


Рис. 19.19.

19.44. Внешняя цепь двух аккумуляторов с одинаковой э. д. с. потребляет максимальную мощность соответственно 20 и 30 Вт. Какую наибольшую мощность может потреблять внешняя цепь от этих аккумуляторов, соединенных: последовательно; параллельно?

19.45. Два генератора с э. д. с. \mathcal{E}_1 и $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$ и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 соединены последовательно разноименными полюсами и замкнуты на сопротивление R . Какую мощность развивает каждый генератор? Чему равен к. п. д. каждого генератора? Какова мощность всей батареи и ее к. п. д.?

19.46. При зарядке аккумулятора была затрачена энергия 0,8 кВт·ч. При разрядке на сопротивление 8 Ом э. д. с. аккумулятора равномерно убывала с 22 до 18 В в течение 10 ч. Вычислите емкость аккумулятора и его к. п. д. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

19.47. Диод включен в цепь, указанную на рисунке 19.20, а. Вольт-амперная характеристика диода дана на рисунке 19.20, б. Какое количество теплоты выделится на сопротивлении R , если замкнуть ключ K ?

19.48. В электрочайник с сопротивлением обмотки 30 Ом налито 0,50 кг воды при температуре 293 К. Через 15-мин выкипело 10% воды при силе тока в обмотке 4 А. Чему равен к. п. д. чайника?

19.49. Свинцовая проволока диаметром d плавится при длительном пропускании тока I_1 . При каком токе расплавится проволока диаметром $2d$? Потери теплоты проволокой в обоих случаях считать пропорциональными поверхности проволоки.

19.50. Электрическая печь имеет две обмотки сопротивлениями R и $2R$. При параллельном включении обмоток печь нагревается на 300 К выше температуры окружающей среды. Полагая, что теплоотдача прямо пропорциональна разности температур печи и окружающей среды, определите, на сколько градусов нагреется печь при последовательном соединении обмоток и неизменном напряжении.

19.51. Нагреватель, рассчитанный на напряжение U_1 , сделан из проволоки длиной l_1 и диаметром d_1 . Какими нужно взять длину и толщину проволоки, чтобы при напряжении U_2 нагреватель потреблял ту же мощность? Теплоотдача проволоки пропорцио-

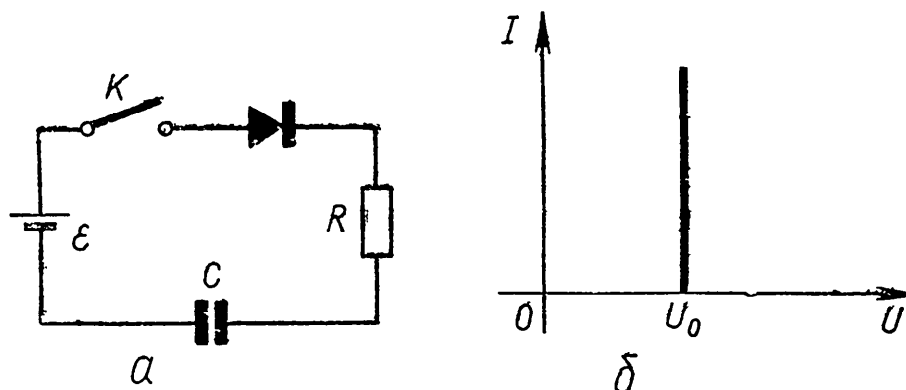


Рис 19.20.

нальна ее поверхности, температуры проволоки и окружающей среды в обоих случаях одинаковы.

19.52. Вольфрамовая спираль с номинальной мощностью P , рассчитанная на напряжение U , имеет в рабочем состоянии температуру t_1 . Спираль включают в сеть через сопротивление R . Считая теплоотдачу пропорциональной разности температур спирали и комнаты, определите рабочую температуру t_2 спирали при наличии добавочного сопротивления. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама α .

19.53. При напряжении сети 120 В вода в электрическом чайнике закипает через 20 мин, при напряжении 110 В — через 28 мин. Через сколько времени закипит вода, если напряжение в сети упадет до 100 В? Потери теплоты от чайника в окружающее пространство пропорциональны времени, начальная температура и масса воды во всех случаях одинаковы.

19.54. Аккумулятор с э. д. с. 12 В заряжают от источника тока с напряжением 12,5 В, при этом в аккумуляторе каждую секунду выделяется тепловая энергия 5 Дж. Чему равна мощность, расходуемая на зарядку аккумулятора?

19.55. Электродвигатель, имеющий сопротивление обмотки 2 Ом, подключен к генератору постоянного тока с э. д. с. 240 В и внутренним сопротивлением 4 Ом. При работе электродвигателя через его обмотку проходит ток силой 10 А. Определите к. п. д. электродвигателя. Какую максимальную мощность может развивать мотор и какой ток пойдет при этом по цепи?

19.56. Момент сил сопротивления, действующих на вал электродвигателя, при установившемся вращении якоря равен M . Мотор питается от источника постоянного тока с э. д. с. \mathcal{E} , полное сопротивление цепи R , ток в цепи I . Какова скорость вращения вала мотора?

19.57. Электродвигатель при напряжении 120 В развивает мощность 160 Вт, делая 2 об/с. Какое максимальное число оборотов может делать двигатель при этом напряжении, если сопротивление цепи якоря 20 Ом и двигатель будет развивать такую же мощность? Какое число оборотов разовьет двигатель при холостом ходе? Трением пренебречь.

19.58. В цепь батареи с э. д. с. 24 В включен электродвигатель. Нагруженный мотор потребляет мощность в 10 раз большую, чем при работе вхолостую. Разность потенциалов на клеммах мотора при нагрузке падает на 20% по сравнению с разностью потенциалов при холостом ходе. Определите мощность тепловых потерь в подводящих проводах при холостом ходе, если нагрузочный ток 5,0 А. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

19.59. В вакуумной лампе расстояние между плоскими электродами $2,5 \cdot 10^{-3}$ м, температура 300 К. Во сколько раз изменится ток через лампу, если ее наполнить неоном при давлении 1,32 Па и той же температуре? Диаметр атомов неона равен $3 \cdot 10^{-10}$ м. При расчете не учитывайте ионизацию атомов и считайте, что ток обус-

ловлен только теми электронами, которые не испытали соударения с атомами. Скоростью атомов Ne по сравнению со скоростью электронов пренебречь.

19.60. Медное кольцо диаметром 0,20 м и сечением $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ вращается вокруг своей оси с угловой скоростью $\omega = 62,8 \text{ } ^\circ/\text{с}$. Какой заряд пройдет по кольцу, если его резко остановить?

19.61. По медной проволоке сечением 10^{-6} м^2 и при температуре 330 К проходит ток 1 А. Считая, что электронный газ удовлетворяет максвелловскому распределению, определите, во сколько раз отличаются средние скорости теплового движения свободных электронов от скорости упорядоченного движения. При расчете считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

19.62. Катод радиолампы представляет собой раскаленную нить, натянутую по оси цилиндра — анода. Диаметр нити d , анода D , высота цилиндра и длина нити h . Между электродами лампы приложено напряжение U и проходит ток I . Определите: а) давление электронов на анод, если их начальная скорость у катода v_0 (отношение заряда электрона к его массе равно γ); б) плотность пространственного заряда ρ как функцию расстояния x от катода. Влиянием пространственного заряда на поле между электродами пренебречь.

19.63. В проводнике, изготовленном из материала с плотностью ρ и атомной массой A , создано электрическое поле с напряженностью E . Полагая, что на каждый атом приходится один электрон проводимости и в единичном объеме проводника выделяется ежесекундно тепловая энергия P , определите время между соударениями электронов с ионами решетки. Удары считать неупругими.

19.64. Считая свободные электроны металла идеальным газом, определите коэффициент теплопроводности серебра при температуре 300 К. Удельное сопротивление серебра при этой температуре $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

19.65. Какую минимальную ускоряющую разность потенциалов должны пройти ионы водорода, чтобы вызвать ионизацию азота? Потенциал ионизации азота 14,5 В.

19.66. Между электродами двухэлектродной лампы включена батарея с э. д. с. 10,0 В. Материалом катода является вольфрам, материалом анода — никель. Какую энергию приобретают электроны, вылетающие с ничтожно малыми скоростями из катода, к тому моменту, когда они достигают анода?

19.67. Металлический шарик имеет температуру T . Полагая, что на каждый атом металла приходится n электронов проводимости и скорости этих электронов подчиняются максвелловскому распределению, вычислите среднюю плотность тока термоэмиссии с поверхности шарика. Работа выхода электрона, атомная масса и плотность металла соответственно равны $A_{\text{вых}}$, A и ρ .

19.68. Чему равен ток насыщения термоэлектронной эмиссии для вольфрамовой нити накала катода при температуре 2700 К в отсутствие внешнего электрического поля, если длина и диаметр нити равны соответственно 3,00 и 0,01 см?

19.69. Определите работу выхода электронов из металла, если при повышении температуры от 2000 К на 0,01 К ток насыщения термоэлектронной эмиссии возрастает на 0,01%.

19.70. Для увеличения термоэлектронной эмиссии на катод нужно наложить ускоряющее электрическое поле (эффект Шоттки). Оцените, во сколько раз возрастет эмиссионный ток с поверхности катода, имеющего температуру 1000 К, если перпендикулярно его поверхности будет создано однородное электрическое поле с напряженностью 10^3 В/м.

19.71. Напряженность электрического поля у поверхности Земли 130 В/м. Это поле создает ток 4,78 мкА через поверхность 10^6 м². Оцените концентрацию ионов каждого знака в атмосфере воздуха, считая ионы однозарядными. За какое время напряженность поля у поверхности Земли уменьшилась бы в 10 раз вследствие вертикального тока ионов, если отсутствовали бы противотоки?

19.72. В ионизационной камере, расстояние между плоскими электродами которой 0,05 м, проходит ток насыщения плотностью $1,6 \cdot 10^{-5}$ А/м². Определите число пар одновалентных ионов, образующихся в каждом кубическом сантиметре пространства камеры за 1 с.

19.73. Через пары ртути, находящиеся при 300 К под давлением 0,266 Па, пропускается пучок электронов с энергией 3 эВ и интенсивностью 1 мА. Какова сила тока в пучке при прохождении им в газе расстояния 0,1 м? Газокинетическое сечение паров ртути $\frac{9}{4} \pi \cdot 10^{-20}$ м².

19.74. Газ между пластинами плоского конденсатора ионизируется рентгеновскими лучами, и каждую секунду в единице объема появляется n_0 электронов. Двигаясь между пластинами, электроны ионизируют газ, причем коэффициент ионизации оказывается равным α . Зная расстояние между пластинами d и пренебрегая ионизацией, обусловленной положительными ионами, найдите плотность тока между пластинами. Концентрацию электронов у катода не учитывать.

19.75. На пластины плоского воздушного конденсатора подано напряжение 300 В. При облучении воздушного промежутка ультрафиолетовым светом гальванометр, включенный в цепь конденсатора, показывает силу тока 10^{-8} А, причем насыщения тока нет. Площадь пластин конденсатора $2 \cdot 10^{-2}$ м², расстояние между ними $4 \cdot 10^{-2}$ м. Определите концентрацию ионов внутри этого конденсатора, зная подвижность ионов воздуха $u_+ = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) и $u_- = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с).

19.76. Два металла сложены вместе, давление электронного газа в металлах равно p_1 и p_2 , работы выхода электрона из одного и другого металла равны соответственно A_1 и A_2 . Определите контактную разность потенциалов при температуре металлов T .

19.77. При электролизе раствора разлагается 4,77 г медного купороса (CuSO₄) в час. Сколько ионов меди нейтрализуется еже-

секундно на катоде? Чему равен ток в растворе? Валентность меди равна 2.

19.78. Электролитическая ванна с раствором медного купороса (CuSO_4) и ванна с раствором азотсеребряной соли (AgNO_3) соединены последовательно. При пропускании тока через ванны в течение некоторого времени растворы потеряли 1 г серебра и 0,21 г меди в прикатодной области. Во сколько раз анионы в растворе медного купороса движутся быстрее катионов?

19.79. С помощью вольтметра получено в течение 5 мин $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ гремучего газа, в результате чего уровень воды в вольтметре оказался на 0,1 м ниже уровня в открытом сосуде. Определите силу тока в вольтметре. Атмосферное давление нормальное, температура окружающей среды 293 К, плотность подкисленной воды $1,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

19.80. Полностью разряженный аккумулятор с э. д. с. 6,8 В и внутренним сопротивлением 1 Ом заряжается от источника напряжением 8 В в течение 50 ч. Какое максимальное давление производит кислород в баллоне объемом $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при температуре 300 К, если его получить электролизом подкисленной воды, подключив заряженный аккумулятор к электродам ванны?

19.81. На электроды электролитической ванны с раствором медного купороса подается синусоидальное пульсирующее напряжение с периодом 10 мин. За это время на электроде выделяется $2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$ меди. Определите амплитуду тока.

19.82. Десятипроцентный раствор поваренной соли, масса которого 0,78 кг, налит в сосуд прямоугольной формы. Противоположные стенки сосуда, отстоящие друг от друга на расстоянии 0,25 м, являются электродами. Сопротивление раствора 10 Ом. Вычислите степень диссоциации. Подвижность ионов натрия и хлорида $u_+ = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $u_- = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

§ 20. Электромагнетизм

20.1. Медный провод сечением S , согнутый в виде трех сторон квадрата, прикреплен своими концами к горизонтальной оси, вокруг которой он может вращаться без трения. По проводу проходит ток силой I . При наложении магнитного поля, направленного вертикально вверх, плоскость рамки отклонилась на угол α . Чему равна индукция магнитного поля? Решите задачу при условии, что провод был согнут в виде полукруга.

20.2. По кольцу диаметром 20,0 мм, сделанному из медной проволоки сечением 1 мм^2 , течет ток силой 100 мА. Кольцо помещено в однородное магнитное поле так, что его ось совпадает с направлением поля. При каком максимальном значении индукции внешнего магнитного поля кольцо не разорвется? Прочность меди на разрыв $2,3 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

20.3. Деревянный цилиндр массой $m = 0,25 \text{ кг}$ и длиной $l = 0,10 \text{ м}$ расположен на наклонной плоскости, составляющей с го-

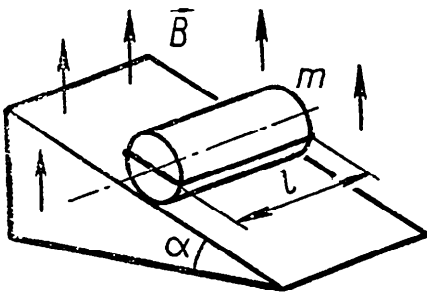


Рис. 20.1.

ризонтом угол $\alpha = 30^\circ$ (рис. 20.1). На цилиндр намотано 10 витков тонкой проволоки так, что плоскость каждого витка проходит через ось цилиндра. Вся система находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл, направленном вертикально вверх. Какой минимальный ток нужно пропустить через рамку, чтобы цилиндр не скатывался с наклонной плоскости? На какой угол повернется цилиндр,

если ток увеличить вдвое? Трение скольжения между цилиндром и наклонной плоскостью велико.

20.4. Рамка зеркального гальванометра подвешена на бронзовой ленте длиной 12,5 см, шириной 0,1 мм и толщиной 0,007 мм. Индукция поля в зазоре постоянного магнита гальванометра 0,05 Тл, площадь рамки 5 см², модуль сдвига бронзы $4 \cdot 10^{10}$ Н/м². Сколько витков проволоки нужно намотать на рамку, чтобы чувствительность гальванометра была $4 \cdot 10^{-10}$ А · (мм/м)⁻¹?

20.5. По тонкому кольцу массой m и радиусом r течет ток силой I . Кольцо расположено горизонтально в вертикальном магнитном поле и находится в равновесии. Определите градиент магнитного поля в том месте, где находится кольцо.

20.6. Плоскость металлического диска массой m и радиусом R расположена перпендикулярно магнитному полю с индукцией B (рис. 20.2). При пропускании тока силой I между скользящими контактами a и b диск начинает вращаться. Определите угловое ускорение диска и мощность, развиваемую таким двигателем в тот момент, когда он наберет n об/мин.

20.7. По трем длинным параллельным проводам, удаленным друг от друга на одинаковое расстояние 0,4 м, проходят токи силой $I = 10$ А, $-I$ и $-2I$. Найдите геометрическое место точек в пространстве, где индукция магнитного поля, создаваемого токами, равна нулю. Какую силу нужно приложить к каждому метру проводника с током $-2I$, чтобы он находился в равновесии?

20.8. Ток силой I идет по длинному проводу, согнутому под углом α . Определите напряженность магнитного поля в точках A и B , лежащих на биссектрисе этого угла и ее продолжении, на расстоянии x от вершины угла. Исследуйте полученный результат как функцию угла α .

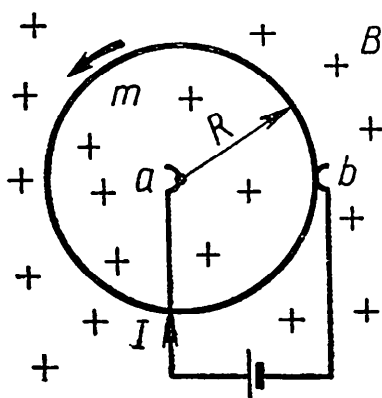


Рис. 20.2.

20.9. По длинной тонкой ленте шириной a и толщиной b проходит ток плотностью j . Определите напряженность магнитного поля в плоскости ленты на расстоянии x от нее.

20.10. По проволоке, согнутой в виде правильного n -угольника, вписанного в окружность радиусом R , пропускается ток

силой I . Найти индукцию магнитного поля на оси многоугольника как функцию расстояния x от его центра. Исследуйте полученное выражение. Рассмотрите частные случаи, когда $n = 3$ и $x = \frac{R\sqrt{3}}{2}$ (тетраэдр); $n = 4$ и $x = R$; $n = \infty$ (кольцо).

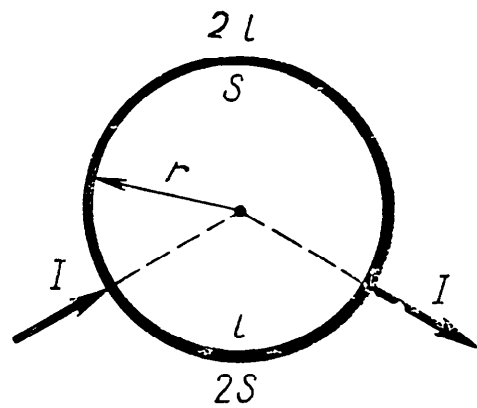


Рис. 20.3.

20.11. Кольцо радиусом $r = 0,1$ м составлено из двух проводников длиной l и $2l$. Сечение проводников равно соответственно $2S$ и S (рис. 20.3). Определите индукцию магнитного поля в центре кольца, если к нему по бесконечно длинным проводам подводится ток $I = 5$ А.

20.12. Контур с током I состоит из двух прямолинейных проводников длиной l , соединенных дугой окружности радиусом l с центральным углом 2φ (рис. 20.4). а) Определите индукцию магнитного поля в центре дуги O . б) Рассмотрите случай, когда длина линейных проводников очень велика и они представляют собой «полубесконечные» прямые.

20.13. Найдите индукцию магнитного поля в центре плоской спирали, по которой течет ток I . Спираль заключена между окружностями радиусов r и R и содержит n полных витков.

У к а з а н и е. При решении задачи используйте уравнение спирали в полярных координатах $\rho = a\varphi$, где a — константа, определяемая условиями задачи.

20.14. Длинный цилиндр радиусом R представляет собой поляризованный диэлектрик. Цилиндр вращается с угловой скоростью ω вокруг своей геометрической оси. Магнитная проницаемость диэлектрика $\mu = 1$. Определите индукцию магнитного поля в точках, лежащих на оси цилиндра и достаточно удаленных от концов цилиндра, если: а) цилиндр равномерно заряжен по объему и его полный заряд равен q ; б) вектор поляризации диэлектрика p во всех точках цилиндра направлен радиально и величина его в зависимости от расстояния r от оси вращения меняется по закону $p = p_0 r$.

20.15. Около длинного прямолинейного проводника, по которому идет ток I_1 , расположен контур, представляющий собой: а) прямоугольник; б) круг. По контуру идет ток I_2 (рис. 20.5, а и б), и $x \gg a$. Какую силу нужно приложить к контуру, чтобы удержать его в равновесии? Какая сила действует на ребро прямоугольника длиной a ? Положение и размеры контуров указаны на рисунке.

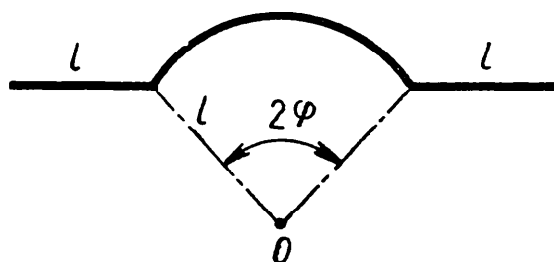


Рис. 20.4.

20.16. Две катушки, магнитные моменты которых равны p_1

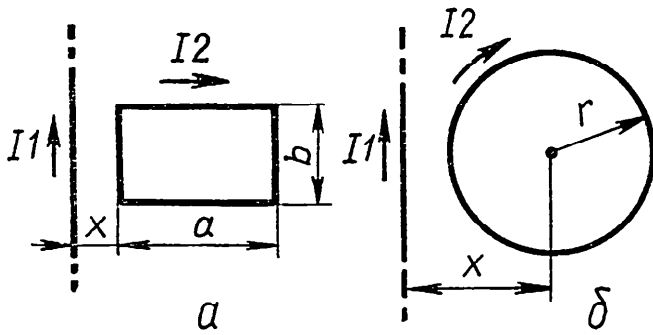


Рис. 20.5.

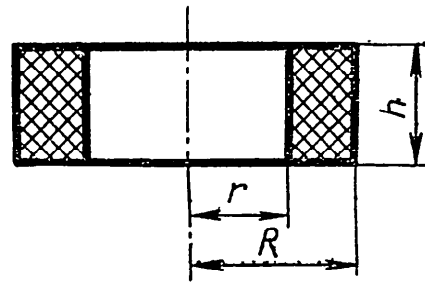


Рис. 20.6.

и p_2 , расположены так, что их оси находятся на одной прямой. Расстояние между катушками l велико по сравнению с размерами катушек. Определите силу взаимодействия катушек. Сравните эту силу с силой взаимодействия диполей, обладающих электрическими моментами p_1 и p_2 .

20.17. Длинная трубка радиусом 10^{-2} м, изготовленная из проводящего материала, сплющивается при пропускании через нее тока 50 А. Какое избыточное давление снаружи может выдержать трубка, будучи запаянной с торцов?

20.18. По длинному соленоиду, имеющему плотность намотки 3300 вит/м, протекает ток силой 0,13 А. Ось соленоида установлена горизонтально в плоскости магнитного меридиана. Период колебаний маленькой магнитной стрелки, помещенной на упругом подвесе внутри соленоида вдоль его оси, оказывается равным 0,2 с. Если ток в соленоиде выключить, период колебаний стрелки становится равным 0,4 с. Определите по этим данным горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

20.19. Обмотка соленоида представляет собой тороид с прямоугольным поперечным сечением, размеры которого указаны на рисунке 20.6 ($r = 5$ см, $R = 8$ см, $h = 5$ см). Число витков в соленоиде $N = 500$, ток $I = 2,4$ А. Определите: во сколько раз максимальная индукция магнитного поля внутри тороида больше минимальной; магнитный поток системы.

20.20. Железный тор с диаметром средней линии 0,10 м имеет площадь сечения 10^{-4} м². Тороид распилен пополам по диаметру. Получившиеся два полукольца составлены вместе и равномерно обмотаны изолированной проволокой. Число витков тороида 500, сила тока в обмотке 0,25 А. С какой силой притягиваются друг к другу части тороида, если магнитная проницаемость тороида равна 4000?

20.21. По петле из двух параллельных проводов радиусом r течет ток I , расстояние между осями проводов a (рис. 20.7). Определите энергию системы, приходящуюся на единицу длины петли.

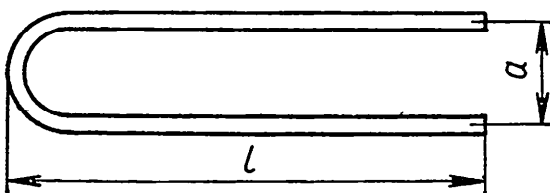


Рис. 20.7.

20.22. Длинный коаксиальный кабель состоит из двух проводников, размеры которых указаны на рисунке 20.8. По кабелю идет ток I . Полагая, что ток распределен по сечению обоих проводников равномерно, определите плотность энергии магнитного поля в функции расстояния x от оси кабеля.

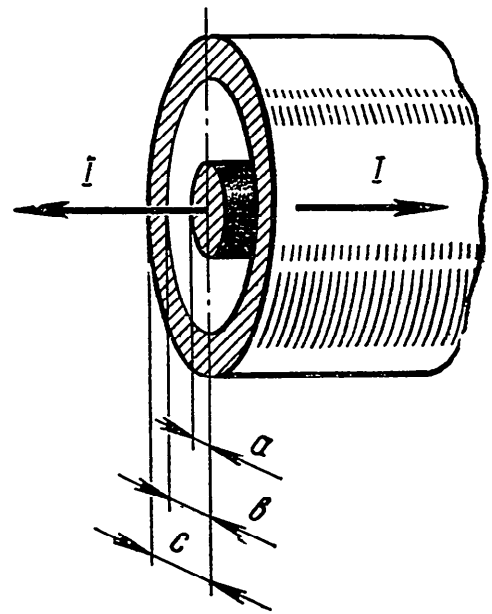


Рис. 20.8.

20.23. Бесконечно длинный проводник круглого сечения радиусом R имеет внутри продольную цилиндрическую полость радиусом r . Расстояние между осями проводника и полости равно $d < (R - r)$. По проводнику течет ток плотностью j . Определите плотность энергии магнитного поля внутри полости.

20.24. Однородный шар радиусом R имеет заряд q , равномерно распределенный по его объему. Шар вращается с угловой скоростью ω вокруг одной из центральных осей. Чему равны плотность энергии магнитного поля в центре шара и его магнитный момент?

20.25. В центре тонкого длинного соленоида расположена маленькая плоская рамка, состоящая из 20 витков площадью 10^{-4} м^2 каждый. По рамке течет ток 1 А того же направления, что и в соленоиде. Плотность намотки соленоида 5000 витков/м, ток в соленоиде 5 А. Какую работу против сил магнитного поля нужно совершить, чтобы рамку переместить в середину основания соленоида? Плоскость рамки перпендикулярна оси соленоида, токи в соленоиде и в рамке считать во время движения неизменными.

20.26. Рядом с длинным прямым проводом, по которому течет ток I_1 , расположена квадратная рамка с током I_2 . Провод и рамка лежат в одной плоскости, как указано на рисунке 20.9. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть рамку вокруг ее оси на 90° , на 180° ?

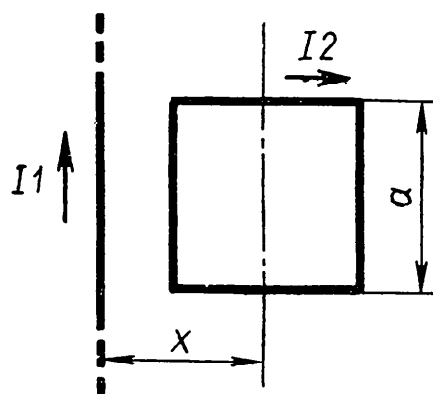


Рис. 20.9.

20.27. Пружина длиной l и радиусом $r \ll l$ имеет N витков. Зазоры между витками малы, коэффициент упругости пружины k . К пружине подвешен груз массой m . На какое максимальное расстояние сместится груз, если по пружине пропустить ток I ?

20.28. Электрон, обладающий кинетической энергией W_0 , влетает в однородное магнитное поле с индукцией B . Скорость электрона направлена перпендикулярно полю. Определите: а) силу, действующую на частицу; б) радиус кривизны траектории; в) период обращения электрона; г) орбитальный магнитный момент электрона.

20.29. Согласно теории Бора в атоме водорода электрон движется вокруг протона по круговой орбите. Если такой атом поместить в магнитное поле с индукцией B , направленной перпендикулярно плоскости электронной орбиты, то частота обращения электрона должна измениться и в спектре излучения водорода должно наблюдаться соответствующее смещение частот. Пренебрегая изменением радиуса электронной орбиты, оцените изменение частоты обращения электрона вокруг ядра.

20.30. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов U , влетает в однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом длиной l , имеющим N витков. В начальный момент времени электрон находится на оси соленоида и его скорость направлена под углом α к полю. а) При какой минимальной силе тока в соленоиде электрон пересечет ось соленоида дважды? б) Сколько времени электрон будет находиться в соленоиде? в) Составьте уравнение траектории электрона. г) Определите магнитный орбитальный момент электрона.

20.31. Пучок атомов натрия влетает в неоднородное магнитное поле со скоростью 10^3 м/с, направленной перпендикулярно вектору индукции и градиенту поля $\frac{\partial B}{\partial x} = 4,1$ Тл/м. Пролетев в начальном направлении расстояние $y_0 = 2$ м, пучок сместился в направлении поля на расстояние $x_0 = 2$ мм. Масса атома натрия $3,84 \cdot 10^{-26}$ кг. Найдите магнитный момент атома и уравнение траектории.

20.32. Цилиндрический проводник радиусом r_0 , по которому течет ток I , эмиттирует в радиальном направлении электроны с начальными скоростями v_0 . На какое максимальное расстояние удалятся электроны от оси проводника?

20.33. Два электрона, летящие со скоростями v_1 и v_2 , в некоторый момент времени расположены относительно друг друга так, как указано на рисунке 20.10. Какая сила действует на электрон? Исследуйте результат в зависимости от значения α .

20.34. Океанское течение имеет скорость 1 м/с в районе, где вертикальная составляющая магнитного поля Земли $3,5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Удельная электропроводность воды 4 См/м. Полагая, что горизонтальная компонента напряженности электрического поля вызвана действием силы Лоренца, определите плотность горизонтальной составляющей электрического тока.

20.35. В электрическое поле с напряженностью E и магнитное поле с индукцией B , совпадающими по направлению, влетает электрон со скоростью v_0 , направленной под углом α к векторам E и B . Установите закон движения электрона.

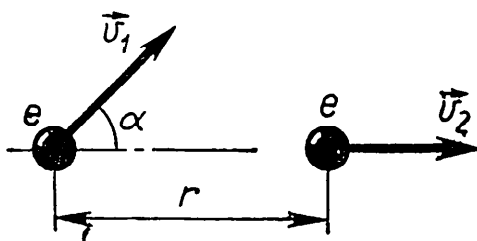


Рис. 20.10.

20.36. Протон начинает двигаться во взаимно перпендикулярных однородных электрическом и магнитном полях с напряженностью E и индукцией B . Найдите: а) законы движения

протона в прямоугольной системе координат; б) максимальное значение кинетической энергии протона; в) расстояние между двумя точками траектории, в которых скорость равна нулю. Установите закон движения протона при условии, что электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны и протон влетает под прямым углом к обоим полям со скоростью v_0 .

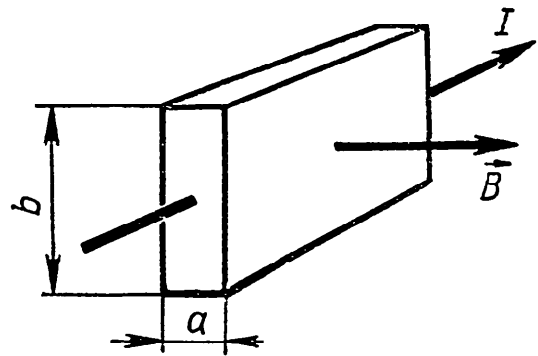


Рис. 20.11.

20.37. Катод и анод магнетрона представляют собой цилиндры радиусами 1 и 20 мм. Разность потенциалов между электродами 220 В. Пренебрегая начальной скоростью электронов, вылетающих с поверхности катода, определите, при каком значении индукции однородного магнитного поля, направленного вдоль оси электродов, ток между ними прекращается?

20.38. Медная пластинка высотой b и шириной a расположена перпендикулярно магнитному полю с индукцией B (рис. 20.11). По пластинке течет ток I . Вследствие отклонения электронов к одной из граней внутри пластинки возникает однородное электрическое поле E_1 , направленное поперек проводника (эффект Холла). Какова величина и направление этого поля? Чему равно отношение напряженности электрического поля E_1 к напряженности поля E_0 , обуславливающему ток в проводнике? Концентрация электронов проводимости в меди известна и равна n . Проведите числовой расчет, положив: $b = 0,02$ м; $a = 10^{-4}$ м; $I = 50$ А; $B = 2$ Тл; $n = 1,1 \cdot 10^{29}$ 1/м³; удельная электропроводность меди $\sigma = 5 \cdot 10^7$ См/м.

20.39. Плоская рамка площадью $4 \cdot 10^{-4}$ м² расположена в магнитном поле так, что нормаль к рамке составляет с направлением поля угол 60° . Индукция магнитного поля, пронизывающего рамку, изменяется по закону (B в теслах) $B = 0,05t$; $B = 0,5(1 + e^{-t})$; $B = 10^{-3} \cos 5t$. По истечении 4 с определите величину э. д. с. индукции, возникающей в рамке, и разность потенциалов между двумя произвольными точками рамки.

20.40. Тонкий медный обруч массой m находится в однородном магнитном поле с индукцией B . Плоскость обруча перпендикулярна направлению поля. Как нужно повернуть обруч, чтобы в нем индуцировался максимальный заряд, протекающий в одном направлении? Какова величина этого заряда? Какое количество электричества пройдет по проводнику, если обруч, потянув за концы диаметра, вытянуть в линию? Плотность меди D .

20.41. Металлический стержень длиной 0,50 м перемещается со скоростью 3 м/с в магнитном поле бесконечного проводника с током 20 А. Стержень и провод расположены в одной плоскости перпендикулярно друг другу, причем ближайший конец стержня

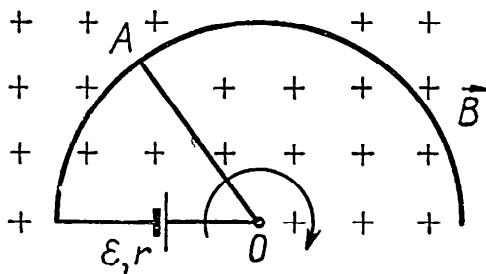


Рис. 20.12.

удален от провода на расстояние 10^{-2} м. Определите разность потенциалов на концах стержня.

20.42. Стержень OA сопротивлением R и длиной l скользит по полукольцу, сопротивление которого ничтожно мало (рис. 20.12). На контур наложено однородное магнитное поле с индукцией B , угловая скорость вращения стержня ω . Найдите: а) разность потенциалов на концах стержня; б) мощность тепловых потерь; в) развиваемую механическую мощность.

20.43. В однородное магнитное поле с индукцией B помещено металлическое кольцо диаметром D , причем его ось совпадает с направлением поля. От центра к кольцу отходят два стержня, имеющие электрический контакт между собой и кольцом. Один стержень неподвижен, второй вращается с угловой скоростью ω . Определите в функции времени силу тока, проходящего через стержни и кольцо, если сопротивление единицы длины каждого стержня и кольца равно r .

20.44. Две параллельные медные шины, расстояние между которыми l , расположены под углом α к горизонту и замкнуты сверху на сопротивление R . Шины находятся в магнитном поле с индукцией B , направленной вертикально вверх. По шинам без нарушения контакта начинает скользить медный брусок массой m , коэффициент трения между шинами и бруском f . Пренебрегая сопротивлением шин и бруска, определите: а) установившуюся скорость v скольжения бруска; б) с каким ускорением будет скользить брусок при $\alpha = 90^\circ$ и $f = 0$ в поле, перпендикулярном плоскости шин, если вместо сопротивления к шинам подключить конденсатор C , источник тока с э. д. с. \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r ? Чему равна максимальная скорость бруска?

20.45. На тонком непроводящем кольце массой m равномерно распределен заряд q . Кольцо может свободно вращаться вокруг своей оси. На кольцо, перпендикулярно его плоскости наложено магнитное поле с индукцией B . Какую угловую скорость приобретет кольцо, если магнитное поле равномерно уменьшить до нуля?

20.46. Тонкий пучок протонов движется по окружности в магнитном поле. Сила тока пучка I_0 , число протонов в пучке n . В некоторый момент времени магнитное поле начинает изменяться со скоростью B . Полагая орбиту пучка неизменной, определите, во сколько раз изменится сила тока протонов за один оборот. Масса и заряд протона известны.

20.47. Внутри длинного железного стержня диаметром d создано магнитное поле, направленное вдоль стержня и изменяющееся с течением времени по закону $B = B_0 + kt$, где k — постоянный коэффициент. Найдите напряженность электрического поля на расстоянии x от оси стержня.

20.48. На железное кольцо сечением $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и средним диаметром 0,126 м равномерно нанесена первичная обмотка, состоящая из 480 витков. Вторичная обмотка, содержащая 5 витков, включена в цепь баллистического гальванометра. Сопротивление вторичной цепи 0,4 кОм, по первичной обмотке проходит ток силой 0,5 А. Определите магнитную проницаемость железа при данной намагниченности, если при изменении направления тока в первичной обмотке на противоположное через гальванометр проходит заряд $6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$.

20.49. В соленоид с силой тока 5А и плотностью обмотки 10^4 1/м свободно опускают маленькую катушку с током 1 А, состоящую из 10 витков. Масса катушки $6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$, сечение 10^{-4} м^2 . Плоскость катушки перпендикулярна оси соленоида. Пренебрегая энергией, идущей на нагревание проводов, оцените максимальную скорость, которую могла бы иметь катушка при падении в соленоид.

20.50. Медный стержень длиной l , шарнирно закрепленный на одном конце, совершает малые колебания в вертикальной плоскости. Перпендикулярно плоскости качания наложено магнитное поле с индукцией B . Определите круговую частоту колебаний стержня. Плотность и удельное сопротивление меди равны D и ρ .

20.51. Тороидальный соленоид представляет собой катушку, согнутую в виде кольца, средний радиус которого R . На катушку намотано n прилегающих друг к другу витков радиусом r . Чему равен коэффициент самоиндукции такого соленоида? Рассмотрите два случая, когда $r \ll R$ и когда r сравнимо с R .

20.52. Из провода диаметром $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ сделана прямоугольная рамка, стороны которой $3 \cdot 10^{-2}$ и 3,00 м. Чему равна индуктивность рамки и энергия магнитного поля? Магнитную проницаемость среды считать равной единице, полем внутри провода пренебречь.

20.53. Кабель сделан из провода и охватывающего его тонкого коаксиального проводящего цилиндра. Радиус провода r , радиус цилиндра R . Ток по проводу и цилиндру идет в противоположном направлении. Вычислите самоиндукцию кабеля, приходящуюся на единицу длины, полагая, что по внутреннему проводнику кабеля течет ток: а) по поверхности; б) распределен равномерно по сечению.

20.54. На длинный железный стержень сечением S нанесена обмотка с плотностью витков n . Сверху обмотки надета короткая катушка из N витков. Магнитная проницаемость сердечника μ . Вычислите коэффициент взаимной индукции катушек.

20.55. Две катушки индуктивностью 3 и 5 мГн соединены последовательно так, что их магнитные поля направлены в одну сторону. Индуктивность всей системы при этом 11 мГн. На сколько изменится индуктивность системы, если катушки переключить так, чтобы магнитные поля в них были направлены навстречу друг другу?

20.56. Вычислите коэффициент взаимной индукции и силу взаимодействия бесконечно длинного проводника с током I_1 и контура, имеющего форму равностороннего треугольника со стороной l ,

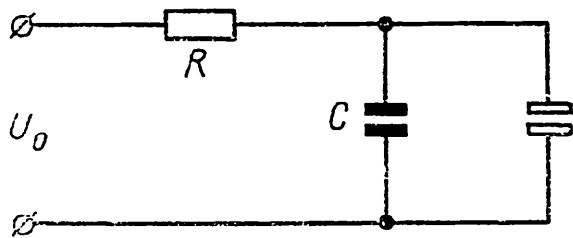


Рис. 20.13.

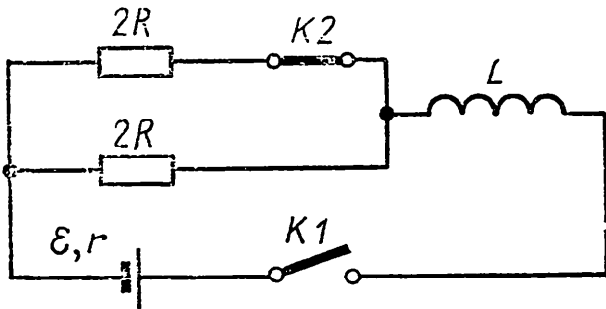


Рис. 20.14.

по которому идет ток I_2 . Провод расположен параллельно стороне треугольника на расстоянии l от нее.

20.57. Конденсатор емкостью C , заряженный до разности потенциалов U , подсоединили к сопротивлению R . По какому закону меняется напряжение на конденсаторе с течением времени? Решите задачу при условии, что конденсатор был замкнут на катушку индуктивности L .

20.58. Конденсатор емкостью C через сопротивление R подключен к источнику постоянного напряжения U_0 (рис. 20.13). К конденсатору подсоединена разрядная трубка, замыкающая

конденсатор в тот момент, когда напряжение на его пластинах достигает потенциала зажигания U_3 и размыкает пластины при некотором напряжении U_r — потенциале гашения. Пренебрегая внутренним сопротивлением разрядной трубки, определите период релаксационных колебаний T напряжения на трубке.

20.59. К источнику постоянного напряжения через сопротивление 1 кОм подсоединили конденсатор емкостью 10 мкФ . Через сколько времени напряжение на конденсаторе достигнет половины максимального? Решите задачу при условии, что вместо конденсатора к источнику подключили катушку с индуктивностью 10 мГн , и найдите время установления тока, равного половине максимального.

20.60. Первичная катушка трансформатора, реостат сопротивлением 360 Ом и источник постоянного тока с э. д. с. 80 В соединены последовательно и составляют цепь с общим сопротивлением 400 Ом . Определите э. д. с. индукции, возникающей во вторичной обмотке трансформатора при равномерном выведении реостата до нуля за $0,5 \text{ с}$. Коэффициент взаимной индукции катушек равен $0,08 \text{ Гн}$.

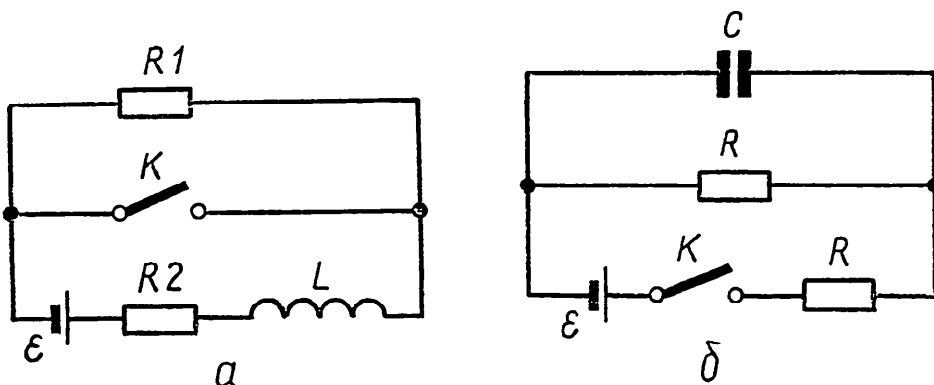


Рис. 20.15.

Переходными процессами в первичной цепи пренебречь.

20.61. Конденсатор емкостью C с помощью ключа замыкается на две параллельно соединенные катушки с индуктивностью L_1 и L_2 . Заряд конденсатора равен q . Пренебрегая сопротивлением и взаимной индукцией катушек, определите максимальные токи, протекающие в катушках.

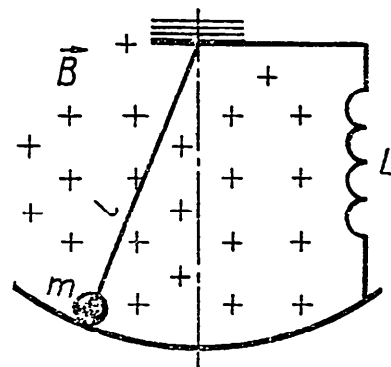


Рис. 20.16.

20.62. а) С какой скоростью изменяется ток в цепи, представленной на рисунке 20.14, при замыкании ключа K_1 ? б) Определите скорости нарастания энергии магнитного поля катушки и рассеивания джоулева тепла. в) Какую энергию каждую секунду отдает батарея во внешнюю цепь спустя время t_1 после ее подключения? г) По какому закону будет меняться ток в цепи, если разомкнуть ключ K_2 ?

20.63. Как изменятся с течением времени ток, текущий через катушку индуктивности, и напряжение на конденсаторе при замыкании ключа K в схемах, указанных на рисунке 20.15, а, б. В схеме а $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $\mathcal{E} = 60 \text{ В}$, $L = 0,2 \text{ Гн}$; в схеме б $C = 5 \text{ мкФ}$, $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$, $R = 10 \text{ Ом}$.

20.64. Маятник состоит из легкого проводящего стержня длиной l , на конце которого подвешен металлический шарик массой m . Маятник может колебаться в плоскости, перпендикулярной к однородному магнитному полю с индукцией B , касаясь при этом проводящей дуги окружности (рис. 20.16). Точка подвеса маятника и дуга окружности соединены с катушкой индуктивности L . Пренебрегая сопротивлением цепи, определите период малых колебаний маятника. Решите задачу при условии, что вместо катушки индуктивности включен конденсатор емкости C .

§ 21. Переменный ток

21.1. Тонкое металлическое кольцо массой m и плотностью D вращается с частотой f в однородном магнитном поле с индукцией B . Ось вращения OO и направление поля взаимно перпендикулярны (рис. 21.1). а) Определите амплитудные и действующие значения тока в контуре. б) По какому закону изменяется ток в контуре при частоте вращения рамки $f = f_0 \sin kt$.

21.2. Плоский контур с индуктивностью L и сопротивлением R вращается с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле с индукцией B . Площадь контура S . Определите силу тока в контуре и мощность, необходимую для его вращения.

21.3. Ток в цепи изменяется с течением времени по законам, представленным на рисунке 21.2, а, б, в и г. Определите среднее и действующее значения тока в цепи.

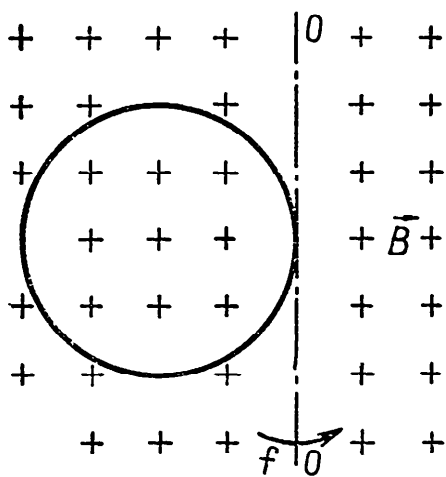


Рис. 21.1.

21.4. Определите полное сопротивление цепи переменному току, имеющему круговую частоту ω , в схемах, указанных на рисунке 21.3, а, б, в, г и д. Величины всех сопротивлений, емкостей и индуктивностей известны.

21.5. Для передачи только переменной составляющей напряжения к сопротивлению 1 кОм , шунтирующему источник, последовательно подключен конденсатор. С сопротивления необходимо снимать напряжение, которое не должно быть меньше подаваемого на 5% в диапазоне частот от 50 до 10 кГц. Определите емкость конденсатора.

21.6. а) На вход контуров (рис. 21.4 а, б и в) подается напряжение $U = U_0 \cos \omega t$. Чему равны токи в контурах? б) При каком соотношении между R_1 , C , L и R_2 напряжения между точками А и В будут одинаковыми?

21.7. Во сколько раз отличаются напряжения между точками А и В при включенном и выключенном рубильнике К в схеме, указанной на рисунке 21.5.

21.8. На вход цепочки, состоящей из очень большого числа индуктивностей L и емкостей C , подается сигнал с частотой ω и амплитудой U_0 (рис. 21.6). Какова амплитуда напряжения на выходе цепочки?

21.9. В сеть переменного тока с напряжением U включен контур, состоящий из трех сопротивлений и двух идеальных диодов

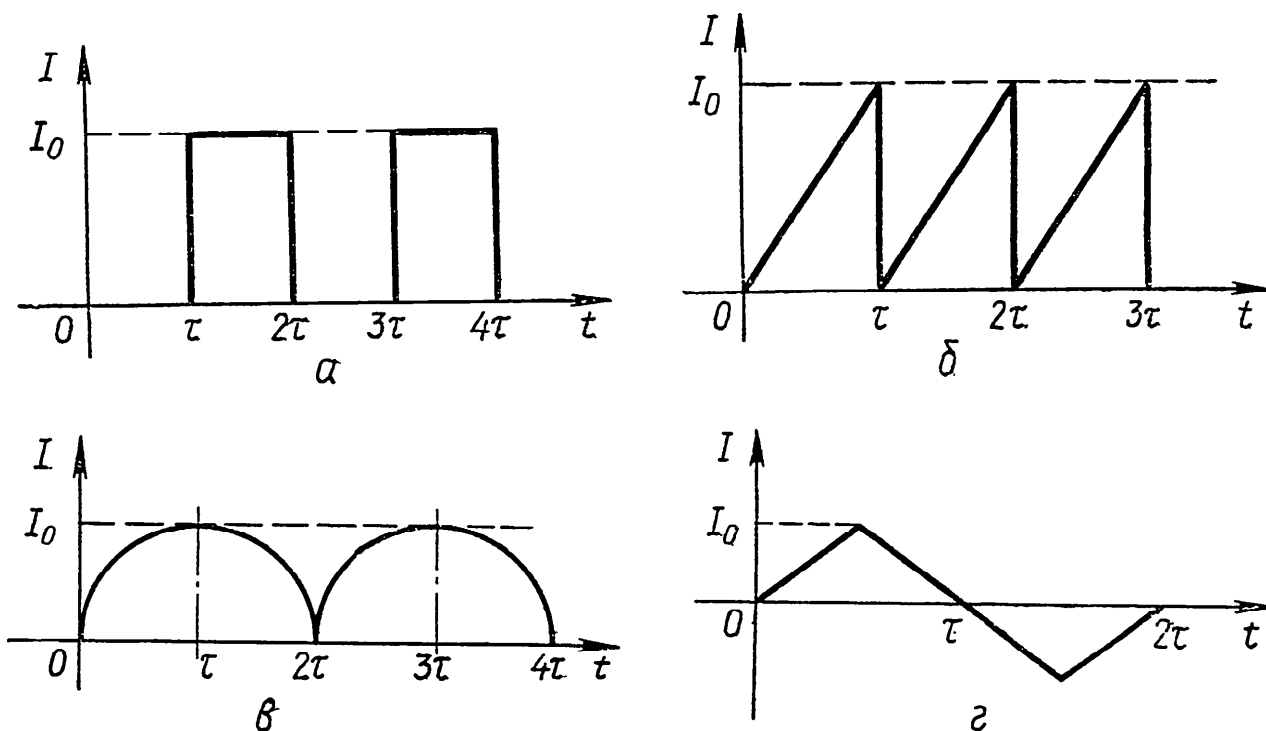


Рис. 21.2.

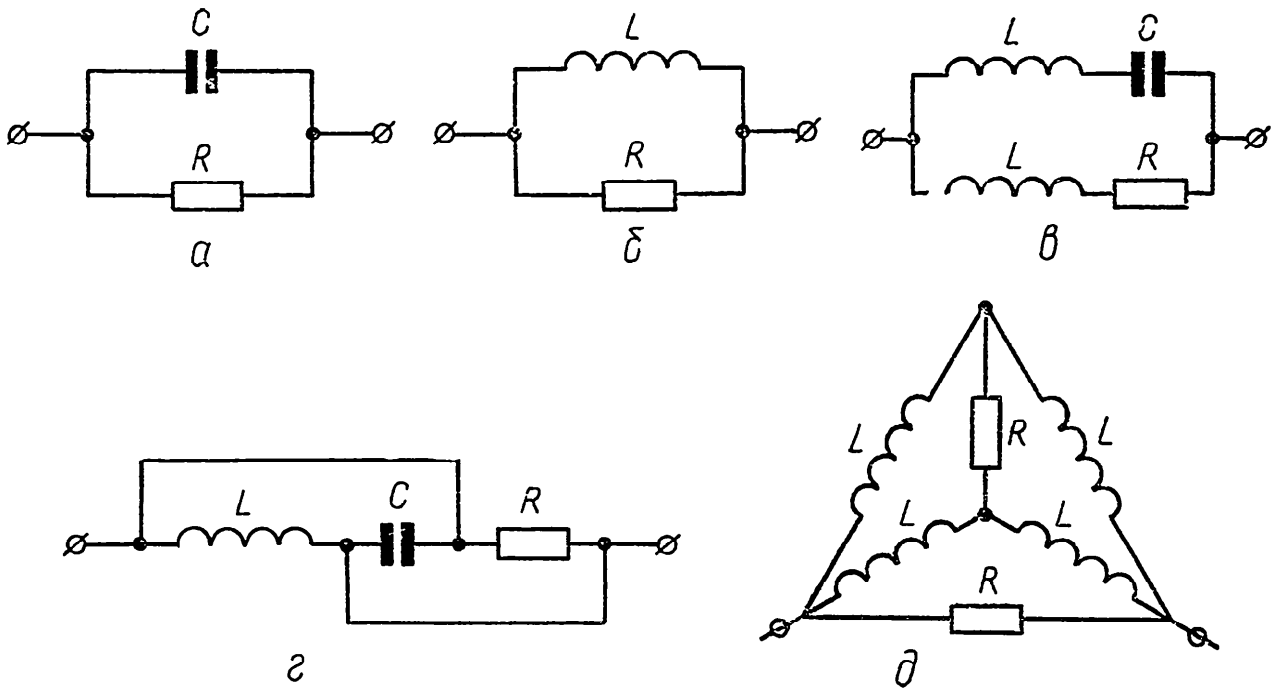


Рис. 21.3.

(рис. 21.7). Какая в среднем мощность выделяется на сопротивлении R_1 за один период?

21.10. Конденсатор емкостью $2 \cdot 10^{-5}$ Ф, дроссель сопротивлением 100 Ом и индуктивностью 0,05 Гн включены последовательно с источником переменного тока частотой 50 Гц. На концах цепи поддерживается действующее напряжение 120 В. а) Определите действующий ток в цепи, сдвиг фаз тока и напряжения, а также напряжения на конденсаторе и дросселе. б) Какая мощность выделяется на активном сопротивлении? При каком значении C мощность, выделяемая на R , максимальна? в) Найдите действующий ток в цепи и сдвиг фаз между током и напряжением при условии, что конденсатор и дроссель соединены параллельно.

21.11. На вход линии электропередачи, потребляющей мощность 100 кВт, подается действующее напряжение 220 В. Сопротивление подводящих проводов линии 0,01 Ом, сдвиг фаз между током и напряжением 37° . Определите мощность, расходуемую потребителем, и напряжение на проводах.

21.12. Участок цепи переменного тока состоит из сопротивления R и катушки индуктивности, соединенных между собой последовательно. Эффективные напряжения на всем участке, сопротивлении

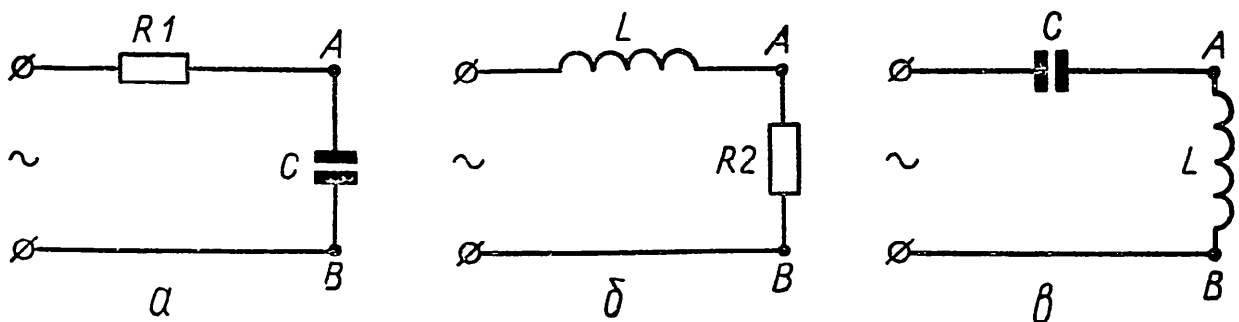


Рис. 21.4.

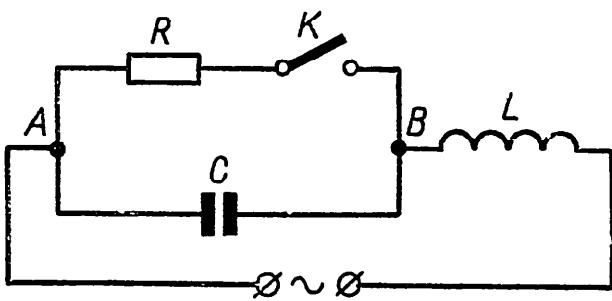


Рис. 21.5.

и катушке равны соответственно U_0 , U_1 и U_2 . Найдите мощность, выделяемую в катушке индуктивности. Определите эту мощность при условии, что сопротивление и катушка соединены между собой параллельно и известны эффективные токи I_0 , I_1 и I_2 — в цепи, катушке и сопротивлении.

21.13. Колебательный контур (рис. 21.8) возбуждается периодическими импульсами. Каждый отдельный импульс создает на конденсаторе дополнительное напряжение U_0 . Промежутки времени между последовательными импульсами в целое число n раз больше периода собственных колебаний контура. Определите амплитуду установившихся колебаний, считая добротность контура большой.

21.14. Емкость и индуктивность колебательного контура равны C и L . Через сколько времени после начала зарядки конденсатора его энергия в n раз превышает энергию катушки индуктивности?

21.15. Колебательный контур с емкостью 10^{-9} Ф настроен на частоту 10^3 кГц. При колебаниях максимальное напряжение на конденсаторе равно 100 В. Пренебрегая активным сопротивлением контура, определите: а) максимальный ток в контуре; б) энергию магнитного поля катушки и энергию электрического поля конденсатора через $1/8$ периода от момента начала колебаний.

21.16. Конденсатор емкостью 1 мкФ с зарядом $8 \cdot 10^{-5}$ Кл разряжается на катушку с индуктивностью 1,6 Гн и сопротивлением 40 Ом. Определите: а) закон изменения напряжения на конденсаторе; б) логарифмический декремент затухания колебаний; в) долю периода, соответствующую изменению тока и напряжения от нуля

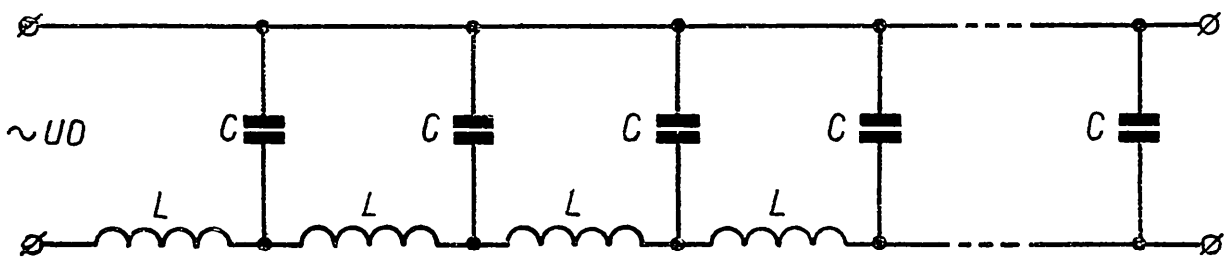


Рис. 21.6.

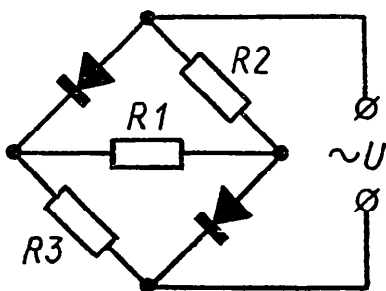


Рис. 21.7.

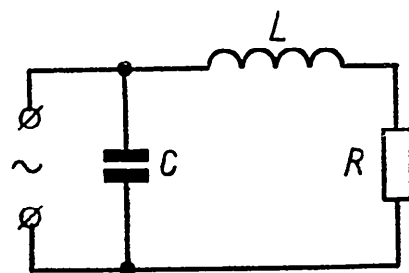


Рис. 21.8.

до максимального значения; г) закон изменения энергии контура в зависимости от времени; д) отношение энергии магнитного поля в катушке к энергии электрического поля в конденсаторе в момент прохождения наибольшего тока; е) часть энергии резонансных колебаний, теряемых в контуре за время, равное периоду колебаний.

21.17. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 10 мкФ , катушки с индуктивностью $0,01 \text{ Гн}$ и омического сопротивления 4 Ом . Какую мощность должен потреблять контур, чтобы в нем поддерживались незатухающие колебания с амплитудой напряжения 1 В ?

21.18. Емкость колебательного контура $1,0 \text{ мкФ}$, индуктивность 10 мГн . Какое омическое сопротивление нужно включить в цепь, чтобы уменьшить резонансную частоту незатухающих колебаний на $0,01\%$?

21.19. Индуктивность, емкость и сопротивление колебательного контура равны соответственно $1,0 \text{ Гн}$, 20 мкФ и 10 Ом . При какой частоте внешней э. д. с. будет достигнут максимум резонанса? При каких частотах амплитуда колебаний равна половине ее резонансного значения?

21.20. Дроссель с индуктивностью 2 Гн и сопротивлением 1 Ом зашунтирован конденсатором емкостью 10^{-4} Ф . На конденсатор подается напряжение $U = 100 \sin 50t$ (U в вольтах). а) Чему равен ток в источнике? б) При каком значении частоты подаваемого напряжения мощность тепловых потерь в дросселе будет минимальной? в) Чему равна эта мощность?

§ 22. Геометрическая оптика

22.1. В известном опыте Майкельсона по определению скорости света восьмигранная призма с зеркалами, вращаясь вокруг своей оси, отражала пучок света от удаленного источника к наблюдателю, расположенному вблизи источника. Расстояние, проходимое светом в одном направлении, было равно $35,410 \pm 0,003$ км, скорость вращения призмы 529 ± 10^3 об/с. Рассчитайте по этим данным скорость света и оцените точность измерений, учитывая, что угол между двумя соседними гранями призмы был равен $135^\circ \pm 0,1^\circ$.

22.2. В опыте Физо расстояние между зубчатым колесом и зеркалом было равно 7,0 км, число зубцов колеса 240. Два последовательных исчезновения света наблюдались при скоростях вращения колеса 283 и 313 об/с. Рассчитайте по этим данным скорость света.

22.3. Средний период обращения одного из спутников Юпитера — Ио равен 42,5 ч. Ремер обнаружил, что этот период регулярно изменяется в течение года и периодичность изменений тоже равна приблизительно году. Максимальное отклонение периода обращения от среднего значения было 15 с и повторялось примерно через 6 месяцев. Пренебрегая движением самого Юпитера, определите по приведенным данным скорость света. Радиус земной орбиты $1,5 \cdot 10^{11}$ м.

22.4. Солнечные лучи, падающие под углом α на плоское горизонтальное зеркало, отражаются на вертикальный экран. На зеркале лежит непрозрачный шар диаметром d . Определите размеры тени на экране. С какой скоростью будет перемещаться край тени, если шар покатится от экрана со скоростью v ?

22.5. Точечный источник света находится между двумя плоскими зеркалами, образующими двугранный угол $\varphi = 2\pi/n$. а) На каком расстоянии друг от друга находятся изображения, даваемые лучами, идущими непосредственно от источника, если источник находится на расстоянии l от линии пересечения зеркал? б) Как будут двигаться эти изображения, если зеркала станут поворачиваться с угловой скоростью ω вокруг оси, проходящей через ребро угла? в) Определите число изображений, даваемых зеркалами. Рассмотрите случай, когда n — целое число и когда n — любое число. При каком условии эта задача имеет определенное решение?

22.6. Три плоских зеркала установлены под углом $\alpha = 60^\circ$ друг к другу (рис. 22.1). На ребре двугранного угла находится светящаяся точка A . а) Найдите изображения этой точки в зеркалах. б) Сколько изображений можно увидеть в зеркале 1, если смотреть на него из точки A ? в) Сколько получится изображений, если светящийся предмет поместить в произвольную точку между зеркалами? г) Покажите, что любой луч, идущий от источника, после трех отражений идет противоположно своему начальному направлению.

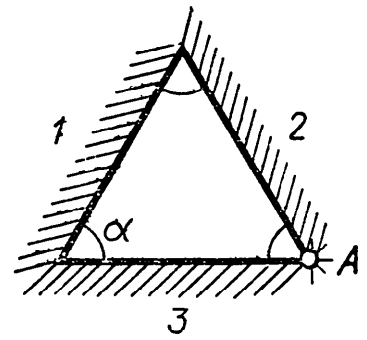


Рис. 22.1.

22.7. Точечный источник света находится на оси вогнутого (выпуклого) сферического зеркала. Расстояния между источником и центром зеркала l , между источником и его изображением L . Чему равен радиус зеркала?

22.8. Короткий предмет длиной l лежит на оси сферического зеркала радиусом R на расстоянии $a > R$ от зеркала. Каково продольное увеличение предмета и как оно связано с поперечным?

22.9. Вогнутое сферическое зеркало дает на экране изображение предмета высотой H_1 . Не меняя расстояние между предметом и экраном, перемещают зеркало и находят, что высота второго четкого изображения H_2 . а) Определите величину предмета и найдите условие, которому должно удовлетворять расстояние между экраном и предметом, чтобы можно было наблюдать оба изображения. б) Чему равно расстояние l , на которое пришлось передвинуть зеркало, если расстояние между предметом и экраном L ? в) Найдите радиус кривизны зеркала.

22.10. Линейный размер изображения лица в плоском зеркале m . Если это зеркало заменить вогнутым сферическим, то человек видит свое изображение в n раз большим, чем в первом случае. Какова величина видимого изображения лица, если на месте плоского поставить выпуклое зеркало с тем же радиусом кривизны, что и вогнутое?

22.11. Сходящийся пучок лучей падает на вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны 30 см. Продолжения лучей пересекаются в точке, находящейся на расстоянии $b = 30$ см за зеркалом. На каком расстоянии от зеркала пересекутся лучи после отражения? Решите задачу при условии, что на месте вогнутого поставили выпуклое зеркало с тем же радиусом кривизны. Рассмотрите случаи, когда $b = 10, 15, 30$ и 40 см.

22.12. На оси зеркала радиусом $2f$ на расстоянии $\frac{4}{3}f$ ($\frac{3}{4}f$) от вершины расположен перпендикулярно главной оптической оси небольшой предмет AB высотой $H \ll f$. Зеркало разрезали на две половинки и раздвинули в вертикальной плоскости на расстояние H (рис. 22.2). а) Определите

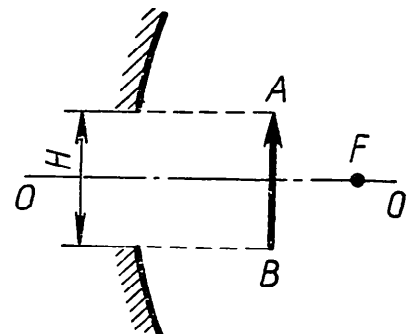


Рис. 22.2.

расстояние между крайними точками изображения. б) Решите задачу при условии, что одну половинку зеркала сместили влево на расстояние f вдоль оси OO .

22.13. В центре вогнутого сферического зеркала с радиусом кривизны R находится плоское зеркало, наклоненное под углом α к главной оптической оси. Найдите изображение точки S в плоском зеркале, даваемое лучами, отраженными от вогнутого зеркала, если расстояние от вершины зеркала до точки S равно $a = \frac{3}{4} R$ и точка лежит на главной оптической оси.

22.14. В центре вогнутого сферического зеркала радиусом R расположено выпуклое зеркало радиусом $R/2$. На каком расстоянии от вогнутого зеркала нужно поместить точечный источник света, чтобы лучи, идущие от источника после отражения от вогнутого (выпуклого), а затем от выпуклого (вогнутого) зеркал, давали изображение, совпадающее с самим источником?

22.15. Исходя из принципа Ферма (свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого минимальна), выведите закон отражения и преломления света, формулу сферического зеркала и тонкой линзы.

22.16. Светящаяся точка находится за плоскопараллельной стеклянной пластинкой толщиной d . Показатель преломления стекла n . Точку рассматривают под малым углом к пластинке. На каком расстоянии от светящейся точки видно ее изображение? Почему мы не замечаем сферической аберрации, рассматривая предметы даже через сравнительно толстые стекла?

22.17. На поверхность слоя четыреххлористого углерода толщиной 4 см налит слой воды 2 см. Показатели преломления CCl_4 и воды равны соответственно 1,46 и 1,33. На какой глубине будет казаться дно сосуда, в который налиты жидкости, если смотреть на поверхность воды под малым углом к нормали?

22.18. На стеклянных фотопластинках изображения звезд окружены ореолом — размытыми световыми кольцами, яркость которых падает по мере удаления от центра. Объясните происхождение ореолов и определите радиус первого кольца ореола для пластинки толщиной 4 мм. Показатель преломления стекла 1,50.

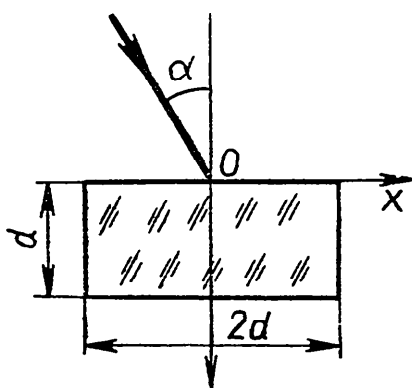


Рис. 22.3.

22.19. Луч света падает под углом $\alpha = 30^\circ$ на плоскопараллельную пластинку толщиной $d = 2$ см и шириной $2d$ (рис. 22.3). Показатель преломления пластинки меняется в направлении нормали по закону $n = n_1 + \frac{n_2 - n_1}{d} y$. а) Определите угол, под

которым луч выйдет из пластинки, и боковое смещение луча, если $n_1 = 1$, $n_2 = 2$. б) Решите задачу при условии, что пока-

затель преломления вещества пластинки меняется по указанному закону в направлении оси OX .

22.20. Плоское зеркало находится в воде на глубине 0,5 м.
а) На какое расстояние будет аккомодирован глаз человека, если он станет рассматривать свое изображение, глядя на зеркало сверху, с расстояния 0,25 м от поверхности воды? В каком случае изображение лица окажется на зеркале? б) Решите задачу при условии, что плоское зеркало заменили вогнутым с радиусом 0,5 м, выпуклым с радиусом 0,5 м.

22.21. Луч света входит в стеклянную призму под углом 2α и выходит под углом $\beta = \alpha$. Преломляющий угол призмы равен $\alpha/2$. Определите угол отклонения луча от первоначального направления и показатель преломления материала призмы.

22.22. Покажите, что наименьшее отклонение параллельного пучка в призме происходит при симметричном ходе лучей. Как будут при этом связаны между собой угол наименьшего отклонения θ , показатель преломления n вещества призмы и преломляющий угол φ ? При каком значении φ угол наименьшего отклонения равен преломляющему углу?

22.23. Трехгранная призма с преломляющим углом 60° дает угол наименьшего отклонения в воздухе 37° . Какой угол наименьшего отклонения даст эта призма в воде? На какой угол нужно повернуть призму в плоскости падающего и преломленного луча, чтобы преломленный луч не выходил из боковой грани призмы, если показатель преломления стекла $n = 1,42$?

22.24. Полая стеклянная равноугольная призма находится в воде. Определите угол наибольшего отклонения такой призмы. Преломлением в стекле пренебречь.

22.25. Луч света падает на основание AC трехгранной равнобедренной призмы ABC с прямым углом при вершине B . При каких значениях угла падения α луч света выйдет из призмы через грань AC ? Коэффициент преломления материала призмы $n = 2$.

22.26. Стеклянный стержень радиусом r имеет на изгибе радиус кривизны R . Показатель преломления стекла n_2 . Стержень находится в среде с показателем преломления n_1 . На какой угол может отклоняться пучок света от осевого направления стержня, чтобы лучи, падающие на один торец стержня, выходили из него только через другой?

22.27. Светящаяся точка находится в воздухе на расстоянии 0,60 м от выпуклой поверхности радиусом 7,5 см, ограничивающей массивный кусок стекла. а) Определите расстояние между изображениями точки, даваемыми лучами, отраженными и преломленными поверхностью. Коэффициент преломления стекла 1,50. б) Решите задачу при условии, что стеклянная поверхность вогнутая.

22.28. Параллельный пучок света, распространяющийся в среде с показателем преломления n_1 , собирается в фокусе преломляющей поверхности, ограничивающей область с показателем преломления

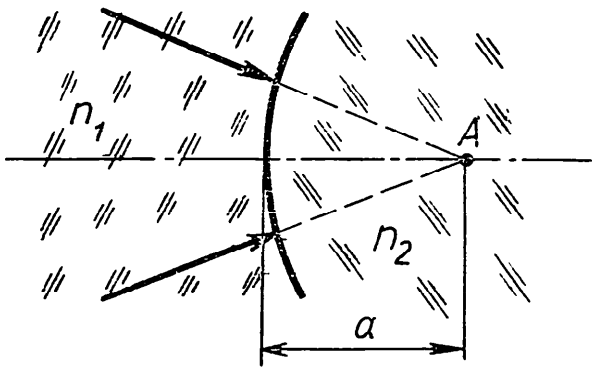


Рис. 22.4.

n_2 . Найдите уравнение этой поверхности при условии, что $n_1 < n_2$; $n_1 > n_2$.

22.29. На сферическую поверхность радиусом R , разделяющую две среды с показателями преломления n_1 и n_2 , падает узкий сходящийся пучок света (рис. 22.4). Если бы показатели преломления сред были одинаковы, то лучи сошлись бы в точке A , удаленной от границы раздела сред на расстояние a . В какой точке пересекутся лучи, падающие на сферическую поверхность? Исследуйте полученный результат в зависимости от знака R , соотношения между n_1 и n_2 , а также от величины расстояния a ($a > R$, $a = R$ при $R < 0$).

22.30. Точечный источник света находится на оси тонкой собирающей (рассеивающей) линзы. Расстояние между источником и ближайшим к нему фокусом l , расстояние между источником и его изображением L . Определите оптическую силу линзы. Рассмотрите возможные варианты.

22.31. Предмет помещен на расстоянии 25 см от переднего фокуса собирающей линзы. Изображение предмета получается на расстоянии 36 см от заднего фокуса. Определите оптическую силу линзы.

22.32. Собирающая линза дает изображение с увеличением 2, если расстояние между предметом и изображением 24 см. Определите оптическую силу линзы.

22.33. Светящийся диск радиусом 1,5 см расположен перпендикулярно оси собирающей линзы с фокусным расстоянием 5 см. Расстояние от предмета до линзы 40 см, диаметр линзы 6 см. Чему равен диаметр светлого пятна на экране, установленном в фокальной плоскости линзы; на двойном фокусном расстоянии?

22.34. Из тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием 5 см вырезана центральная часть шириной $h = 1$ см. Обе половинки линзы после этого были сдвинуты до соприкосновения. На главной оптической оси неразрезанной линзы на расстоянии $a = 15$ см от линзы находился точечный источник света. Определите расстояние между изображениями источника, которые получатся в этой системе. Решите задачу при условии, что линза была разрезана на две части и затем обе ее половинки раздвинуты на расстояние 1 см (рис. 22.5).

22.35. Если между предметом и экраном поместить тонкую линзу с фокусным рас-

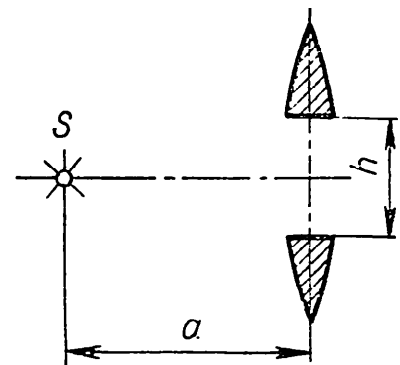


Рис. 22.5.

стоянием f , то четкое изображение предмета получается при двух положениях линзы, расстояние между которыми равно l . Чему равно отношение размеров изображений в этих случаях?

22.36. Предмет, поставленный перпендикулярно главной оптической оси тонкой линзы, дал прямое мнимое изображение, величина которого оказалась в 2 раза больше (меньше) предмета. Если предмет сместить на 10 см вдоль оптической оси, изображение предмета: а) увеличится; б) уменьшится еще в 2 раза. Где находился предмет вначале и какова оптическая сила линзы?

22.37. Наблюдатель стоит в комнате спиной к удаленному окну и держит перед глазом на вытянутой руке тонкую симметричную двояковыпуклую (двояковогнутую) линзу. Фокусное расстояние линзы 28 см, показатель преломления стекла 1,5. Какие изображения окна видит наблюдатель и каковы их положения относительно линзы?

22.38. Тонкая линза с показателем преломления n и радиусами кривизны R_1 и R_2 расположена на границе раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 . а) Определите оптические силы линзы. б) На каком расстоянии b от линзы находится изображение светящейся точки, расположенной в первой среде на главной оптической оси на расстоянии a от линзы? в) Проанализируйте полученные результаты в зависимости от величины и знака радиусов кривизны поверхностей линзы, а также значений n_1 и n_2 . Найдите Φ_1 , Φ_2 и b при условии, что $R_1 = R_2 = R$ и $a = R$.

22.39. В куске стекла с показателем преломления n имеется воздушная полость в виде тонкой двояковыпуклой (двояковогнутой) линзы с радиусами кривизны поверхностей R . На оптической оси линзы внутри куска стекла на расстоянии a от линзы находится песчинка. На каком расстоянии от линзы будет находиться изображение песчинки?

22.40. Тонкая плоско-выпуклая (плоско-вогнутая) линза опущена в воду в горизонтальном положении так, что ее выпуклая поверхность находится в воде, а плоская в воздухе. Радиус кривизны выпуклой поверхности равен 15 см, показатель преломления стекла 1,5. На оси линзы на расстоянии 15 см от нее под водой находится светящаяся точка. Где находится изображение этой точки? Где будет изображение, если линзу перевернуть?

22.41. Оптическая система состоит из тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием f и плоского зеркала, расположенного на расстоянии l от линзы перпендикулярно ее главной оптической оси. а) Определите фокусное расстояние системы f_c как функцию расстояния l и постройте график зависимости $f_c = f(l)$. б) Найдите положение и величину изображения предмета высотой h_0 , установленного на расстояниях $a = 2f$, $a = f$ от линзы при условии, что $l = f/2$, $l = f$.

22.42. На тонкую рассеивающую линзу падает параллельный пучок лучей от удаленного источника, расположенного на главной оптической оси линзы. За линзой перпендикулярно ее оптической

оси находится плоское зеркало. Перемещая линзу, находят такое расстояние a между линзой и зеркалом, при котором через линзу видно яркую светящуюся точку, лежащую в плоскости зеркала. Определите фокусное расстояние линзы. На какое расстояние сместится светящаяся точка, если зеркало отодвинуть от линзы еще на расстояние a ?

22.43. Точечный источник света находится на расстоянии 30 см от тонкой положительной линзы с оптической силой 5 дптр. На какое расстояние сместится изображение источника, если: а) между линзой и источником поместить стеклянную пластинку толщиной 15 см и показателем преломления $\frac{3}{2}$; б) все пространство между линзой и предметом заполнить водой?

22.44. Тонкая двояковыпуклая линза с радиусами кривизны 0,2 м и показателем преломления 1,5 опущена в воду в горизонтальном положении так, что одна ее сторона полностью находится в воде. В воде на расстоянии 0,2 м от линзы перпендикулярно главной оптической оси находится плоское зеркало. Найдите положение изображения светящейся точки, расположенной в воздухе на главной оптической оси линзы на расстоянии 0,2 м от линзы; в бесконечности.

22.45. Имеется тонкая плоско-выпуклая (плоско-вогнутая) линза с радиусом кривизны R и показателем преломления стекла n . Плоская сторона линзы посеребрена. Найдите положение и величину изображения предмета высотой h_0 , находящегося на главной оптической оси линзы на расстоянии R от линзы. Решите задачу при условии, что посеребрена выпуклая (вогнутая) поверхность линзы.

22.46. Две тонкие линзы с фокусными расстояниями f_1 и f_2 находятся на расстоянии l друг от друга. а) Определите фокусные расстояния системы и положения главных плоскостей, исследуйте полученный результат в зависимости от знаков f_1 и f_2 , в зависимости от расстояния l . Постройте график зависимости $f = f(l)$. б) Каковы фокусное расстояние системы и положения главных плоскостей, если пространство между линзами заполнить водой?

22.47. Две тонкие линзы с фокусными расстояниями 0,10 и —0,125 м установлены на расстоянии 0,05 м друг от друга. а) Аналитически и графически определите эквивалентную оптическую силу системы и положение эквивалентных кардинальных точек системы. б) Найдите величину и положение изображения предмета высотой 4 см, расположенного на расстоянии 2 м перед оптической системой.

22.48. Предмет расположен перед оптической системой, состоящей из двух тонких собирающих линз. Переднее фокусное расстояние системы равно 40 мм, заднее 30 мм, расстояние между главными плоскостями системы 10 мм, расстояние между предметом и передней главной плоскостью системы 20 мм. На каком расстоянии от заднего фокуса находится изображение предмета и каковы его размеры? Чему равно расстояние между предметом и его изображением?

22.49. Тонкие симметричные линзы (собирающая с показателем преломления n_1 и рассеивающая с показателем преломления n_2) имеют одинаковые радиусы кривизны поверхности R . Линзы сложили вплотную и погрузили в среду с показателем преломления n_0 . Определите фокусное расстояние системы. Чему равны фокусные расстояния, если в среде окажется только выпуклая сторона линзы? вогнутая?

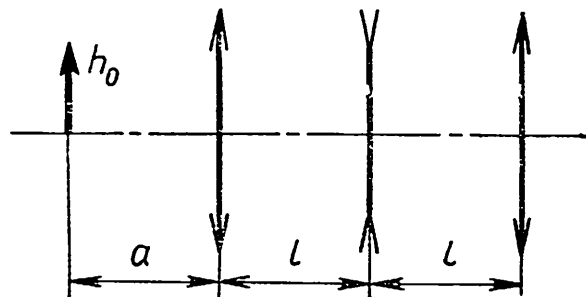


Рис. 22.6.

22.50. Две тонкие линзы, расположенные на расстоянии 12 см друг от друга, образуют телескопическую систему, дающую увеличение —5. Линзы изготовлены из стекла с показателем преломления 1,5. а) Какова оптическая сила системы этих линз, если их сложить вплотную? б) Как нужно изменить расстояние между линзами, чтобы они образовывали телескопическую систему в воде? Каким будет тогда увеличение системы?

22.51. На рисунке 22.6 показана центрированная оптическая система, состоящая из трех тонких линз, установленных на расстоянии $l = 5$ см друг от друга. а) Определите положение и величину изображения предмета высотой $h_0 = 1$ см, расположенного перпендикулярно оси системы на расстоянии $a = 5,0$ см от первой линзы. б) Где нужно поместить этот предмет, чтобы он и его изображение оказались расположенными симметрично относительно системы? $\Phi_1 = 10$, $\Phi_2 = -10$ и $\Phi_3 = 10$ дптр.

22.52. Найдите построением и расчетом положение главных точек и главных фокусов стеклянной линзы толщиной d , находящейся в воздухе, если: а) передняя поверхность линзы выпуклая с радиусом кривизны R , вторая плоская; б) обе поверхности выпуклые с радиусом кривизны R . При какой толщине d оптическая сила такой линзы в воздухе равна нулю? в) Одна поверхность линзы вогнутая с радиусом кривизны R , другая плоская; г) обе вогнутые с радиусами кривизны $-R$; д) линза имеет форму шара радиуса R .

22.53. Выпукло-вогнутая стеклянная линза имеет толщину d и радиусы сферических поверхностей R_1 и R_2 . а) При каком значении d линза будет телескопической? б) Где будет находиться изображение светящейся точки, расположенной на главной оптической оси линзы на расстоянии $a = R$ от ее выпуклой поверхности при $|R_1| = |R_2| = R$?

22.54. На рисунке 22.7, а и б показано положение главных плоскостей оптической системы H_1 и H_2 , предмет AB и его изображение A_1B_1 . Найдите построением положение фокусов системы.

22.55. Зная положение переднего F_1 и заднего F_2 фокусов толстой линзы, положение передней H_1 и задней H_2 главных точек, постройте изображение светящейся точки S при следующих расположениях точки S и кардинальных точек: а) $F_1SH_1H_2F_2$;

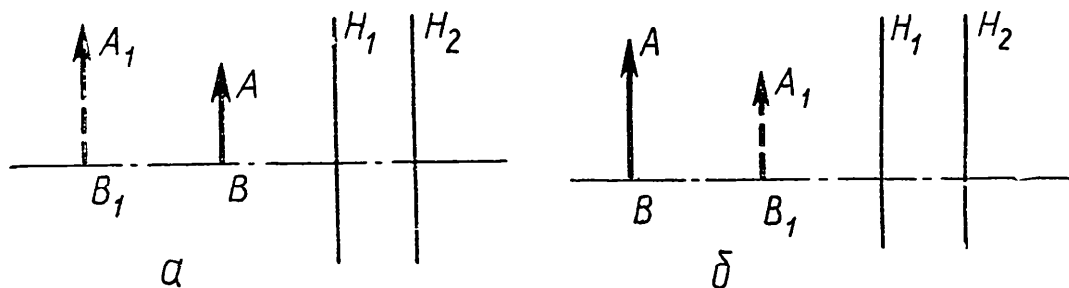


Рис. 22.7.

б) $H_1SF_2F_1H_2$; в) $H_2SF_2F_1H_1$; г) $F_2H_2SH_1F_1$; д) $F_1H_1F_2H_2$, точка S находится в F_1 ; е) $H_2F_2F_1H_1$, точка S находится в H_2 .

22.56. На рисунке 22.8, а и б показан ход луча до и после прохождения толстой симметричной линзы, а также ее передняя главная плоскость. Найдите построением положения задней главной плоскости, переднего и заднего фокусов. На рисунке 22.8, в и г указан ход луча, падающего на толстую линзу, ее главные плоскости H_1 , H_2 и задний фокус F_2 . Найдите ход луча, прошедшего через линзу.

22.57. Стекланный шар имеет радиус 4 см и показатель преломления 1,5. Найдите: а) расстояние от центра шара до изображения предмета высотой 0,2 см, расположенного на расстоянии 6 см от поверхности шара; б) величину изображения, даваемого шаровой линзой.

22.58. В вогнутое зеркало радиусом R , лежащее на горизонтальном столе, наливают воду. Как меняется фокусное расстояние системы в зависимости от толщины слоя воды в зеркале?

22.59. Телескопическая система состоит из двух стеклянных шаров, радиусы которых 5,0 и 1,0 см. а) Определите расстояние между центрами шаров и увеличение системы, если объективом

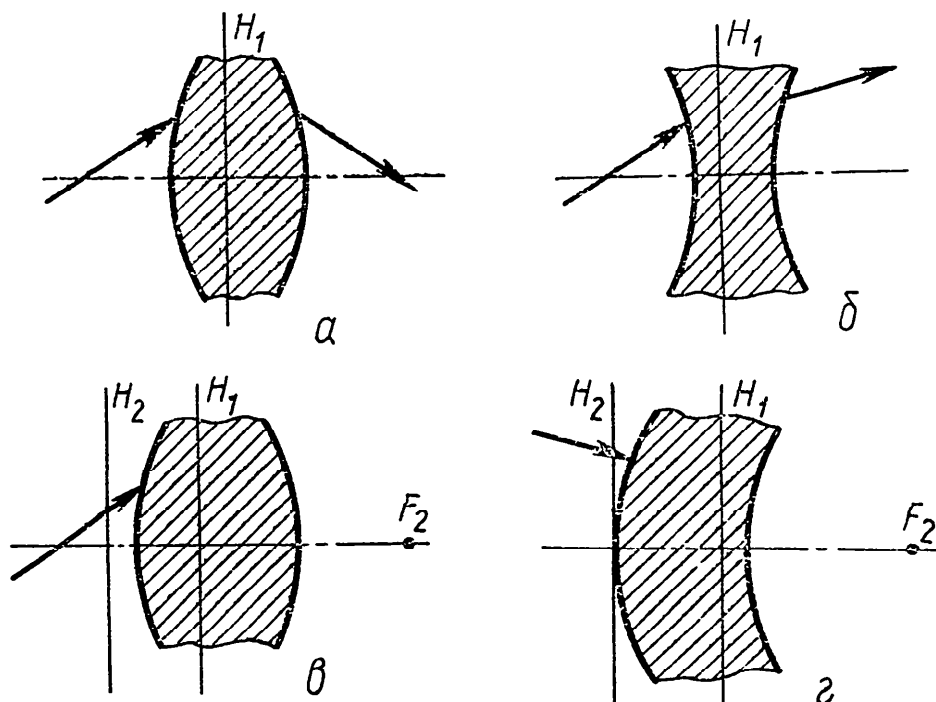


Рис. 22.8.

является большой шар. б) Какова оптическая сила системы, если шары сдвинуты вплотную?

22.60. Поверхность Земли фотографируют со спутника, летающего на высоте 100 км. Объектив фотокамеры имеет фокусное расстояние 10 см. Минимальный размер видимых деталей изображения на пленке (разрешающая способность пленки) 10^{-2} мм. Определите минимальные размеры предметов, находящихся на Земле, которые получатся на пленке; время экспозиции, при котором орбитальное движение спутника не влияет на качество изображения.

22.61. Матовое стекло фотоаппарата установлено так, что резким выходит изображение предмета, находящегося на расстоянии 5 м. До какого диаметра нужно задиафрагмировать объектив с фокусным расстоянием 0,20 м, чтобы не была заметной нерезкость в изображении предметов, находящихся на расстоянии 4,5 м? Нерезкость считать незаметной, если размытость деталей не превышает 0,1 мм.

22.62. Для фотообъективов существует некоторое минимальное расстояние $a_{\text{мин}}$ между линзой и предметом, при котором предметы изображаются на пленке еще достаточно резко, если объектив сфокусирован на бесконечность. Это расстояние называется гиперфокальным. Полагая максимально допустимый диаметр кружка нерезкости равным $\delta = 0,04$ мм, определите гиперфокальное расстояние объектива с фокусным расстоянием $f = 4,0$ см и относительным отверстием $\frac{d}{f} = 1 : 16$.

22.63. Угол поля зрения объектива фотоаппарата в воздухе 97° . Чему станет равным этот угол, если фотоаппарат поместить в бокс для подводной съемки? Среда камеры фотобокса — воздух, показатель преломления морской воды 1,337.

22.64. Проекционный аппарат, объектив которого имеет оптическую силу Φ_1 , установлен на расстоянии l от экрана. Во сколько раз изменится площадь изображения кадра, если на объектив надеть насадочную линзу с оптической силой Φ_2 ?

22.65. Найдите увеличение лупы (рассматривая ее как толстую центрированную систему) в зависимости от положения предмета и глаза наблюдателя. Координата предмета относительно фокальных точек и координата, определяющая положение глаза относительно заднего фокуса окуляра, равны соответственно x_1 и x_2 . При каком положении предмета увеличение не зависит от положения глаза. При каком положении глаза увеличение не зависит от положения предмета? Чему равно увеличение, когда глаз аккомодирован на минимальное расстояние наилучшего видения 25 см?

22.66. Двояковыпуклая симметричная лупа дает увеличение 4. Диаметр выходного зрачка 0,4 см, расстояние от линзы до выходного зрачка 3,5 см. Полагая, что поле зрения лупы 4,5 см и показатель преломления стекла 1,50, определите: а) оптическую силу лупы; б) радиус кривизны поверхностей; в) положение предмета относительно передней поверхности лупы; г) световой диаметр.

22.67. Человеческий глаз хорошо видит предметы, удаленные на расстояние от 25 см до бесконечности. Вплотную к глазу приставили тонкую линзу с фокусным расстоянием 5 см. На каких расстояниях от глаза должен находиться предмет, чтобы его было видно отчетливо? Каково угловое увеличение предмета для каждого из двух предельных положений предмета?

22.68. Близорукий человек носит очки с оптической силой 5 дптр. На каком расстоянии от лица человек должен держать выпуклое сферическое зеркало радиусом 0,6 м, чтобы резко видеть в зеркале свое изображение без очков?

22.69. Дальнозоркий человек при чтении в очках держит книгу на расстоянии наилучшего зрения нормального глаза (25 см). Если близорукий человек надевает очки дальнозоркого, он вынужден держать книгу на расстоянии 12,5 см. На каком расстоянии дальнозоркий будет отчетливо видеть предметы в очках близорукого?

22.70. Труба Галилея 10-кратного увеличения при установке на бесконечность имеет длину 0,45 м. Определите: а) фокусные расстояния объектива и окуляра трубы; б) расстояние, на которое нужно сместить окуляр, чтобы ясно видеть предметы, находящиеся на расстоянии 50 м.

22.71. Человек с нормальным зрением рассматривает удаленный предмет с помощью зрительной трубы Галилея, объективом и окуляром которой служат линзы с оптической силой 2,5 и —50 дптр. При каких расстояниях между объективом и окуляром наблюдатель увидит четкое изображение предмета, если пределы аккомодации глаза изменяются от 10 см до бесконечности?

22.72. Театральный бинокль, дающий трехкратное увеличение, имеет диаметр объектива 3,2 см, оптическую длину 8,0 см и диаметр выходного зрачка 0,4 см, причем он удален от задней главной плоскости окуляра на расстояние 10 см. Определите диаметр и положение входного зрачка, а также поле зрения бинокля в пространстве предметов.

22.73. Зрительная труба Кеплера состоит из объектива, имеющего фокусное расстояние 10,0 см, относительное отверстие 1 : 5 и угол поля зрения 8° , сетки и окуляра с фокусным расстоянием 2,0 см. Определите: а) увеличение трубы; б) диаметр зрачков входа и выхода; в) угол поля зрения окуляра; г) световой диаметр сетки.

22.74. Зрительная труба Кеплера имеет фокусное расстояние объектива и окуляра соответственно 40 и 3 см. Труба наведена на Солнце, и его изображение сфокусировано на экран, расположенный на расстоянии 15 см от окуляра. Определите расстояние между объективом и окуляром, а также диаметр изображения, если угловой размер Солнца $30'$.

22.75. Микроскоп имеет длину 17,0 см. Фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно 0,54 и 2,0 см. На каком расстоянии от объектива нужно поместить предмет, чтобы его отчетливо видел наблюдатель с нормальным зрением? Каково при этом увеличение предмета?

§ 23. Фотометрия

23.1. Над серединой круглого стола радиусом R на высоте H от его поверхности висит лампа силой света I . Определите: а) среднюю освещенность стола; б) во сколько раз средняя освещенность стола меньше максимальной; в) на какой высоте нужно повесить лампу, чтобы освещенность на краю стола была максимальной; г) кривую светораспределения лампы, при которой освещенность стола будет равномерной.

23.2. Солнечные лучи проходят через отверстие диаметром 2,0 см и освещают расположенный за ним белый экран. На каком расстоянии следует поставить экран, чтобы освещенность в его центре была втрое меньше освещенности, создаваемой лучами в плоскости отверстия? Угловой диаметр Солнца $30'$.

23.3. Полный световой поток, излучаемый прямой нитью накаливания длиной 0,6 м, равен 132 лм. Считая яркость нити всюду одинаковой, определите наибольшую освещенность плоской поверхности, расположенной параллельно нити на расстоянии 5 см от нее.

23.4. В сосуд с зеркальным дном налита вода до высоты $2H$. На глубине H находится точечный источник света силой I . На высоте H над водой, на одной вертикали с источником расположена пластинка радиусом $r \ll H$. Пренебрегая потерями света при отражении и поглощении, определите среднюю освещенность пластинки.

23.5. Экран \mathcal{E} и плоское зеркало Z образуют двугранный угол $\alpha = 45^\circ$ (рис. 23.1). Между экраном и зеркалом на одинаковом расстоянии l от них помещен точечный источник света S . Какова освещенность экрана в точке A , если сила света источника равна I ?

23.6. Точечный источник, сила света которого равна I , находится на главной оптической оси вогнутого зеркала радиусом R . В центре зеркала перпендикулярно его оси расположен экран. Чему равна максимальная освещенность экрана, если коэффициент отражения зеркала k и источник удален от зеркала на расстояние: а) $a = \frac{R}{4}$; б) $a = \frac{R}{2}$? в) Изменится ли и как ответ п. б), если вогнутое зеркало заменить выпуклым с тем же радиусом кривизны?

23.7. Экран находится на расстоянии $L = 100$ см от светящегося шарика. Помещая между шариком и экраном тонкую собирающую линзу, можно получить изображение шарика на экране при двух положениях линзы, отстоящих друг от друга на расстоянии $l = 20$ см. Во сколько раз отличаются яркости изображения шарика? Решите задачу при условии, что вместо L и l даны увеличения шарика $\Gamma_1 = 5$ и $\Gamma_2 = 2$.

23.8. Точечный источник силой света I_0 находится в переднем фо-

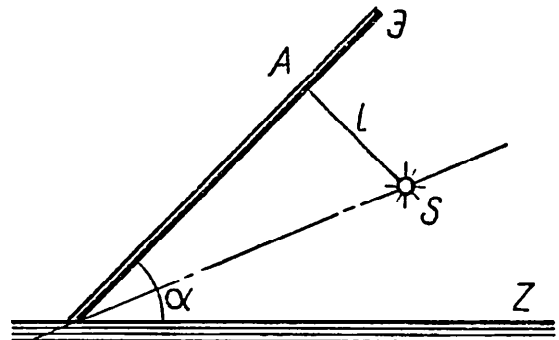


Рис. 23.1.

кусе тонкой линзы с оптической силой Φ . В задней фокальной плоскости линзы расположен экран, а перед источником света, на двойном фокусном расстоянии от линзы установлено плоское зеркало. Диаметр линзы значительно меньше ее фокусного расстояния. Определите освещенность светлого пятна на экране.

23.9. В фокусе плоско-вогнутой линзы радиусом R находится точечный источник силой света I . Радиус кривизны вогнутой поверхности R , показатель преломления стекла n . Определите среднюю освещенность светлого пятна на экране, установленном на расстоянии R от линзы. Потерями света вследствие отражения и поглощения пренебречь.

23.10. Объективом небольшой светосилы фотографируют предмет с уменьшением в 2 раза. Во сколько раз нужно изменить выдержку при съемке в тех же условиях, если предмет снимать в натуральную величину?

23.11. При фотографировании лунного диска в полнолуние объективом со светосилой 10^{-2} на пленку с чувствительностью 1 лк·с качественная фотография была получена при выдержке 0,1 с. Угловой размер Луны 10^{-2} рад. Какую освещенность создает Луна на Земле в полнолуние?

23.12. Объектив зрительной трубы Галилея имеет диаметр 6 см, увеличение трубы равно 60. С какого максимального расстояния можно увидеть с помощью этой трубы свет зажженной спички, если невооруженным глазом это можно сделать с расстояния 1 км? Диаметр зрачка принять равным 3 мм, потерями света пренебречь. При каком увеличении трубы освещенность изображения объекта на сетчатке глаза будет не меньше, чем в отсутствие трубы?

23.13. Луну рассматривают сначала невооруженным глазом, а затем в трубу Кеплера с фокусным расстоянием объектива 8,00 м, окуляра 0,05 м (0,025 м). Диаметр объектива 0,08 м. Пренебрегая потерями света в трубе и полагая диаметр зрачка равным 3 мм, определите, во сколько раз изменится освещенность изображения Луны на сетчатке глаза.

23.14. Изображение Солнца получено на экране посредством системы из двух линз с фокусными расстояниями $f = 0,10$ м, установленными на расстоянии $l = f/2$ друг от друга. Посередине между линзами находится круглая диафрагма диаметром $d = 0,75$ см. Полагая диаметр линз достаточно большим, угловой диаметр Солнца 10^{-2} рад, определите, во сколько раз яркость изображения Солнца больше, чем яркость экрана, освещаемого прямыми лучами. Потерями света в линзах пренебречь.

23.15. На лист белой бумаги падают лучи от лампочки силой света 100 кд. Определите светимость и яркость листа бумаги в точке, находящейся на расстоянии 1,5 м от лампочки, если лучи в этой точке падают на бумагу перпендикулярно. Коэффициент отражения принять равным 0,75.

23.16. Яркость поверхности лунного диска 50 кд/м². Оцените радиус круглого зеркала, которое нужно установить на спутнике,

чтобы с его помощью можно было бы получить освещенность Москвы в безлунную ночь такую же, какая бывает в полнолуние. Средний диаметр Москвы примите равным 50 км. Поглощением света в атмосфере и зеркале пренебечь. Солнечная постоянная 1350 Вт/м^2 . Угловой диаметр Луны 10^{-2} рад.

23.17. Электрическая лампочка мощностью 40 Вт имеет световую эффективность 1,8%. Лампа кажется однородно яркой в области сферы диаметром 2 см. Яркость ее поверхности в 10 раз больше яркости полной Луны. На каком расстоянии от лампы создаваемая ею освещенность равна освещенности земной поверхности в полнолуние? Чему равна эта освещенность? Угловой диаметр Луны 10^{-2} рад.

23.18. Точечная нить лампы накаливания дает силу света 10^3 кд и находится в матовой сферической колбе диаметром 0,10 м. Определите: а) полный световой поток, излучаемый лампой; б) яркость лампы; в) освещенность, светимость и яркость экрана площадью $15,7 \text{ м}^2$, на который падает 10% светового потока лампы, если коэффициент отражения 0,8; г) световую отдачу источника, если он потребляет электрическую мощность 100 Вт.

23.19. Полагая яркость неба повсюду равномерной и равной B , определите освещенность E на горизонтальной площадке, освещаемой небесной полусферой.

23.20. Над центром площадки радиусом 10 м подвешен светильник, светящаяся часть которого имеет вид диска радиусом $r = 5,65$ см. Яркость светильника $1,6 \cdot 10^4$ кд/м² не зависит от направления. а) На какой высоте нужно поместить светильник, чтобы освещенность периферийных точек площадки была максимальной? Чему будет равна эта освещенность? б) Решите задачу при условии, что светильник представляет собой равномерно светящуюся сферу радиусом r .

23.21. По какому закону меняется величина светового потока, излучаемого светящейся плоскостью с единицы поверхности в зависимости от угла α , образуемого лучами с нормалью к плоскости? Под каким углом к нормали происходит максимальное излучение?

23.22. Яркость граней светящегося куба одинакова во всех направлениях и равна $5 \cdot 10^3$ кд/м². Ребро куба 0,20 м. В каком направлении сила света куба наибольшая? Чему она равна?

23.23. Освещенность поверхности Земли в точке нормального падения солнечных лучей 10^5 лк. Полагая, что излучение Солнца подчиняется закону Ламберта, и пренебрегая поглощением света в атмосфере, определите яркость Солнца, среднюю освещенность поверхности Земли, среднюю и максимальную яркость Земли при наблюдении ее со стороны Солнца. Средний радиус земной орбиты $1,5 \cdot 10^8$ км, диаметр Солнца $1,4 \cdot 10^6$ км, коэффициент отражения Земли принять равным 0,8.

23.24. В качестве проекционного объектива диаскопа используется фотообъектив «Юпитер-9» с относительным отверстием 1 : 2. Какова должна быть яркость источника, чтобы при линейном уве-

личении, равном 100, освещенность изображения на экране была не менее 100 лк? Коэффициент светопропускания всей системы проектора 0,2.

23.25. Матовая лампочка проецируется на экран линзой с фокусным расстоянием 0,30 м и диаметром 0,05 м. Расстояние между линзой и источником 1,20 м, освещенность изображения на экране 10^3 лк. Чему равна светимость источника?

23.26. На расстоянии $3a$ от равномерно светящейся плоскости расположено матовое стекло. Энергетическая светимость плоскости равна Φ_0 . Между плоскостью и матовым стеклом на расстоянии a от стекла помещен непрозрачный экран, в центре которого находится отверстие диаметром $d \ll a$. Определите освещенность матового стекла в центре светлого пятна. Как изменится ответ, если в отверстие экрана вставить тонкую линзу с фокусным расстоянием $f = 2a$?

23.27. Определите освещенность изображения в микроскопе с числовой апертурой 1 и увеличением 625, если освещенность предмета равна 100 лк. Расстояние наилучшего зрения 25 см, диаметр зрачка глаза считать равным 4 мм. Потерями света в микроскопе пренебречь. При каком увеличении микроскопа освещенность изображения на сетчатке глаза не зависит от увеличения? (Рассмотрите случай, когда световой пучок, проходящий через систему микроскоп — глаз, ограничен оправой объектива.)

§ 24. Волновая оптика

24.1. В опыте Юнга экран был удален от отверстий на расстояние 5 м. Расстояние между отверстиями 0,5 см, расстояние от третьего интерференционного максимума до центральной полосы 0,15 см. Определите: а) длину волны монохроматического света; б) расстояние между соседними светлыми интерференционными полосами; в) какова будет картина на экране, если его освещать белым светом?

24.2. Расстояние между двумя мнимыми изображениями источника света в зеркалах Френеля $d = 0,7$ мм, расстояние от изображений до экрана $l = 2,267$ м, ширина темной полосы интерференции $x = 1,9$ мм, расстояние от источника до линии пересечения зеркал $r = 10$ см. Определите: а) длину волны монохроматического света, падающего на зеркала, острый угол между ними и число полос на экране; б) закон распределения интенсивности света на экране; в) допустимые размеры точечного источника, при которых можно наблюдать отчетливую картину интерференции.

24.3. Тупой угол стеклянной бипризмы Френеля ($n = 1,5$) равен 179° , длина волны источника света 0,60 мкм, расстояние от источника света до бипризмы 8 см, до экрана 5 м. Определите расстояние между соседними интерференционными полосами и число полос интерференции.

24.4. Источник света в виде узкой щели, дающий монохроматический свет с длиной волны 5000 \AA , находится на оси собирающей

линзы на расстоянии 5 см от линзы. Фокусное расстояние линзы 10 см. Из линзы вырезали центральную часть шириной 0,5 мм и обе половинки сдвинули. На каком расстоянии от линзы нужно поместить экран, чтобы на нем можно было наблюдать три интерференционные полосы? Чему равно максимально возможное число полос, которое можно наблюдать в данной установке? Где нужно поместить источник, чтобы расстояние между соседними полосами не зависело от положения экрана? При какой максимальной ширине щели осветителя интерференционные полосы наблюдаются достаточно отчетливо?

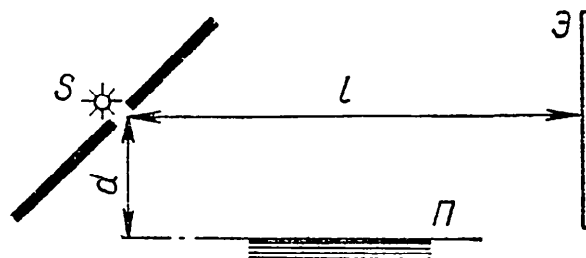


Рис. 24.1.

24.5. В опыте Ллойда по интерференции (рис. 24.1) в качестве отражателя света используется поверхность стеклянной пластинки Π , а источником света служит параллельная ей светящаяся щель. Середина щели находится на расстоянии $d = 1$ мм от продолжения отражающей поверхности, экран \mathcal{E} удален от щели на расстояние $l = 4$ м, длина волны $\lambda = 0,7$ мкм. На каком расстоянии от середины центральной полосы находится третья светлая полоса? Какую ширину должна иметь щель, чтобы полосы были достаточно четкими?

24.6. На тонкую пленку воды под углом $\alpha = 52^\circ$ падает параллельный пучок белого света. а) При какой толщине пленки зеркально отраженный свет окрашен в желтый цвет ($\lambda = 0,6$ мкм) наиболее сильно? б) В каких пределах может меняться толщина пленки, чтобы можно было наблюдать максимум k -го порядка желтого света?

24.7. Рассеянный монохроматический свет с длиной волны 0,60 мкм падает на пленку толщиной 15 мкм с показателем преломления 1,5. Определите угловое расстояние между соседними максимумами, наблюдаемыми в отраженном свете под углами с нормалью, близкими к 45° .

24.8. Интерференция при отражении света наблюдается в тонком стеклянном клине. Расстояние между соседними темными полосами 5 мм, показатель преломления стекла 1,5, длина световой волны 0,58 мкм. Определите угол между гранями клина.

24.9. Две плоскопараллельные стеклянные пластинки приложены одна к другой так, что между ними образовался воздушный клин с острым углом $30''$. На одну из пластинок падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. На каком расстоянии от линии соприкосновения пластинок наблюдаются первая и вторая светлые полосы в отраженном свете? Как изменится это расстояние, если пространство между пластинками заполнить водой?

24.10. Полосы равной толщины наблюдаются в воздушном пространстве между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками, образующими малый угол. Клин освещается рассеянным

монохроматическим светом. Пластинки рассматривают с расстояния наилучшего зрения (25 см) в направлении, перпендикулярном к поверхности клина, причем глаз может смещаться перпендикулярно к ребру клина. Оцените максимальное число интерференционных полос, которые можно видеть при диаметре зрачка глаза 5 мм; степень монохроматичности ($\Delta\lambda/\lambda$), необходимую для того, чтобы такое число полос могло наблюдаться.

24.11. Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны сферической поверхности 12,5 см сильно прижата к стеклянной пластинке. Диаметры десятого и пятнадцатого темных колец Ньютона в отраженном свете равны соответственно 1,0 и 1,5 мм. Определите длину волны света.

24.12. Ширина 10 колец Ньютона, отсчитываемых вдали от их центра, равна 0,7 мм, ширина следующих 10 колец 0,4 мм. Определите радиус кривизны линзы, если наблюдение производится в отраженном свете при длине волны 0,589 мкм.

24.13. Две одинаковые плоско-выпуклые линзы из кронгласа ($n = 1,51$) соприкасаются своими сферическими поверхностями. Определите оптическую силу такой системы, если в отраженном свете с длиной волны 0,60 мкм диаметр пятого светлого кольца Ньютона равен 1,5 мм. Каков диаметр пятого кольца, если пространство между линзами заполнено сероуглеродом ($n_c = 1,63$)?

24.14. Плоско-выпуклую линзу с радиусом кривизны R_1 положили выпуклой поверхностью на двояковогнутую линзу с радиусами кривизны поверхностей $R_2 > R_1$. На плоскую поверхность собирающей линзы нормально падает монохроматический свет с длиной волны λ . Чему равны радиусы колец Ньютона, возникающих вокруг точки соприкосновения линз?

24.15. Чему должны быть равны показатель преломления пленки и ее наименьшая толщина, чтобы ею можно было просветлить поверхность стекла для зеленого света с длиной волны 0,55 мкм? Показатель преломления стекла для этой длины волны $n = 1,52$.

У к а з а н и е. Коэффициент отражения естественного света от поверхности диэлектрика при нормальном падении лучей

$$\rho = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{(n - n_0)^2}{(n + n_0)^2},$$

где Φ и Φ_0 — отраженный и падающий световые потоки, n — показатель преломления диэлектрика, n_0 — показатель преломления окружающей среды.

24.16. Точечный источник монохроматического света с длиной волны 0,55 мкм помещен на расстоянии 5 м от круглой диафрагмы. По другую сторону диафрагмы на расстоянии 1 м от нее находится экран. а) Чему равен радиус k -й зоны Френеля? б) При каких радиусах диафрагмы центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет темным и при каких светлым, если перпендикуляр, опущенный из источника на плоскость диафрагмы, проходит через

ее центр? в) При каком радиусе диафрагмы освещенность экрана наибольшая, если на диафрагму падает плоская волна?

24.17. На пути плоской монохроматической световой волны с интенсивностью I_0 поставлен экран, а перед экраном диафрагма с круглым отверстием. а) Чему равна интенсивность света в центре экрана напротив отверстия, если отверстие сделать равным первой зоне Френеля; половине первой зоны? б) Какова будет интенсивность, если диафрагму с отверстием заменить круглым диском, который закрывает только первую зону Френеля?

24.18. На тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием 0,5 м падает плоская световая волна длиной 0,54 мкм. Непосредственно за линзой находится диафрагма с круглым отверстием и на расстоянии 0,75 м от диафрагмы — экран. При каких радиусах отверстия диафрагмы центр дифракционной картины на экране будет иметь максимальную и при каких — минимальную освещенность?

24.19. Найдите угловое положение первых минимумов, которые находятся по обе стороны от центрального максимума, при дифракции Фраунгофера от щели шириной 10 мкм, если угол падения света 30° и длина волны 0,50 мкм.

24.20. Монохроматический свет падает на щель шириной 28,5 мкм и после прохождения щели фокусируется линзой на экран, отстоящий от нее на расстоянии 10 см. На экране наблюдаются дифракционные полосы, среднее расстояние между которыми 0,23 см. Определите длину световой волны, падающей на щель.

24.21. На дифракционную решетку по нормали к ее поверхности падает параллельный пучок лучей с длиной волны 0,589 мкм. Посредством линзы с фокусным расстоянием 1 м, установленной вблизи решетки, дифракционный спектр проецируется на экран, расположенный параллельно решетке. Расстояние между максимумами в спектре первого порядка оказалось равным 11,8 см. Определите постоянную решетки, число штрихов на 1 мм, число максимумов, даваемых решеткой, и максимальный угол отклонения лучей, соответствующих последнему дифракционному максимуму.

24.22. Свет длиной волны 0,6 мкм падает нормально на дифракционную решетку. Два смежных главных максимума имеют место при $\sin \varphi_1 = 0,2$ и $\sin \varphi_2 = 0,3$, причем спектр четвертого порядка отсутствует. Определите: а) расстояние между смежными щелями; б) наименьшую возможную ширину отдельной щели; в) линии каких порядков наблюдаются на экране при ширине щелей найденных в пунктах а и б.

24.23. Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на решетку с периодом 2,2 мкм, если угол между максимумами первого и второго порядков 15° . Чему равно угловое расстояние между главным максимумом и ближайшим к нему минимумом, если решетка имеет 200 штрихов?

24.24. Монохроматический свет с длиной волны 0,530 мкм падает под углом $\alpha = 0$ ($\alpha = 60^\circ$) на дифракционную решетку с периодом 1,5 мкм. Под каким углом с нормалью к решетке образуется

максимум наибольшего порядка? Каков будет ответ, если пространство между решеткой и экраном заполнить сероуглеродом ($n = 1,63$)?

24.25. На спектрограмме, полученной посредством дифракционной решетки и фотокамеры с оптической силой объектива 2 дптр, расстояние между двумя спектральными линиями с длинами волн 6939 и 6912 Å в спектре третьего порядка оказалось равным 2 мм. Определите постоянную решетки и угол дифракции лучей в этом порядке спектра. Рассмотрите два случая: решетка расположена под углом к главной оптической оси объектива; перпендикулярно к ней.

24.26. Определите ширину спектральной линии водорода $\lambda = 0,656$ мкм в спектре первого порядка, даваемого решеткой длиной 3 см. Фокусное расстояние линзы, проецирующей спектр на экран, равно 15 см. (Шириной спектральной линии называется половина расстояния между двумя минимумами, лежащими рядом с этой линией.)

24.27. Определите дисперсию D и разрешающую способность r дифракционной решетки в спектре k -го порядка, если ее период d и число щелей N . Покажите, что разрешающая способность решетки независимо от ее периода никогда не превышает значения отношения l/λ , где l — длина решетки. Найдите угловую ширину дифракционного максимума при нормальном падении лучей на решетку.

24.28. Какова должна быть длина дифракционной решетки, имеющей 50 штрихов на 1 мм, чтобы в спектре второго порядка разрешить две линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 0,5800$ и $\lambda_2 = 0,5896$ мкм. При какой наименьшей разности длин волн двух спектральных линий одинаковой интенсивности их можно будет разрешить этой решеткой вблизи λ_1 в максимальном порядке спектра?

24.29. Коллиматорная щель спектрографа, освещаемая монохроматическим светом с длиной волны, лежащей вблизи значения 0,50 мкм, находится в фокальной плоскости линзы с оптической силой 4 дптр. Пройдя через линзу, свет падает на стеклянную призму с основанием $a = 10$ см и преломляющим углом 60° , установленную на угол наименьшего отклонения. Показатель преломления стекла призмы 1,73. Какова должна быть ширина s коллиматорной щели, чтобы можно было практически полностью использовать теоретическую разрешающую способность призмы, равную $a \frac{dn}{d\lambda}$?

24.30. Лазерный пучок света диаметром 10^{-2} м, расходимость которого определяется только дифракцией, направлен на Луну. Длина волны лазерного излучения 0,633 мкм. Чему равен диаметр освещаемой на Луне поверхности?

24.31. При естественном освещении наибольшая чувствительность человеческого глаза приходится на длину волны желтого цвета, равную примерно 0,550 мкм. Чему равно в этом случае минимальное разрешаемое угловое расстояние для глаза при адаптации на небольшие яркости? Диаметр зрачка принять равным 4 мм. На каком максимальном расстоянии наблюдатель может различать по

отдельности две желтые фары автомобиля, установленные на расстоянии 1,2 м друг от друга? Каково наименьшее разрешаемое нормальным глазом расстояние между штрихами, начерченными на листе бумаги, находящемся на расстоянии наилучшего зрения?

24.32. Телескоп 100-кратного увеличения имеет окуляр с фокусным расстоянием 2 см. Принимая диаметр зрачка глаза равным 4-мм, определите разрешающую способность φ телескопа для длины волны 5500 \AA ; размеры зерен эмульсии пленки, установленной в фокальной плоскости объектива, чтобы при данном значении φ изображения звезд на фотографии получились отдельными.

24.33. Диаметр объектива зрительной трубы 50,0 мм. Светящиеся точки излучают волны длиной 0,55 мкм. Чему равна разрешающая способность объектива и минимальное расстояние между двумя светящимися точками, удаленными от трубы на расстояние $3 \cdot 10^3$ км, которое может разрешить эта труба? При каком минимальном увеличении трубы ее разрешающая способность используется полностью, если диаметр зрачка глаза считать равным 4,0 мм?

24.34. Числовая апертура объектива микроскопа $n \sin u = 0,24$. Чему равно минимальное расстояние, которое может разрешить микроскоп при оптимальном освещении предмета светом с длиной волны 0,55 мкм? При каком минимальном увеличении микроскопа полностью используется разрешающая способность его объектива при диаметре зрачка 4,0 мм?

24.35. Объектив микроскопа имеет диаметр 2 мм и фокусное расстояние 8,0 мм. Определите фокусное расстояние окуляра, если размеры наименее разрешаемых деталей предмета представляются наблюдателю порядка 0,2 мм. Расстояние между фокусами объектива и окуляра 120 мм. Предмет освещается монохроматическим светом с длиной волны 0,6 мкм, падающим параллельно оси микроскопа.

24.36. Предельный угол полного внутреннего отражения на границе жидкости с воздухом 43° . Определите: а) под каким углом должен падать естественный свет из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный свет был максимально поляризован; б) чему равен коэффициент отражения жидкости; в) степень поляризации света при преломлении.

24.37. При каком значении преломляющего угла стеклянной призмы ($n = 1,5$) углы входа и выхода луча из призмы являются углами полной поляризации? Решите задачу при условии, что призма погружена в воду.

24.38. Естественный свет с интенсивностью I_0 падает на вход устройства, состоящего из двух скрещенных поляроидов. а) Какова интенсивность света, прошедшего через систему, если между поляроидами поместить третий поляроид, ось которого составляет с осью первого угол α . б) Решите задачу при условии, что на вход системы падает линейно-поляризованный свет с направлением поляризации, составляющим угол α с осью первого поляроида. в) Решите задачу при условии, что на вход падает свет, поляризованный по кругу.

24.39. Поляризатор освещен параллельным пучком естественного света, падающим перпендикулярно к его поверхности. Освещенность поляризатора 84 лк. Какова освещенность экрана, поставленного за анализатором, если плоскости поляризации поляризатора и анализатора будут сдвинуты на 60° и каждый николю поглотит 4% проходящего через него света?

24.40. Частично линейно-поляризованный свет рассматривается через николю. При повороте николя на угол 60° от положения, соответствующего максимальной яркости, яркость пучка уменьшается в 3 раза. Найдите отношение интенсивностей естественного и линейно-поляризованного света, а также степень поляризации пучка.

24.41. На стеклянную пластинку ($n = 1,52$) под углом 20° падает пучок света, прошедшего через николю, главное сечение которого составляет с плоскостью падения угол 30° . Определите: во сколько раз яркость света, падающего на николю, меньше яркости света, отраженного от стекла; степень поляризации отраженных лучей; коэффициент отражения стекла.

24.42. Какова может быть максимальная толщина кварцевой пластинки, вырезанной параллельно оптической оси, чтобы линейно-поляризованный свет с длиной волны $0,589$ мкм после прохождения через нее испытывал только поворот плоскости поляризации; оказался поляризованным по кругу? Толщина пластинки в обоих случаях не должна превышать $0,50$ мм. Показатели преломления кварца для обыкновенного и необыкновенного лучей равны соответственно $1,5442$ и $1,5533$. При какой минимальной толщине пластинки плоскополяризованный свет выходит из нее поляризованным по кругу?

24.43. Для каких волн видимой части спектра кристаллическая пластинка толщиной 1 мм, вырезанная параллельно оптической оси, служит пластинкой в четверть волны? Разность показателей преломления обыкновенных и необыкновенных лучей в диапазоне видимого излучения $9,0 \cdot 10^{-3}$.

24.44. Между двумя скрещенными поляроидами помещена пластинка в полволны; четверть волны. Оптическая ось пластинки параллельна оси одного из поляроидов. На систему падает пучок естественного света интенсивностью I_0 . Чему равна интенсивность света, прошедшего через систему? Решите задачу при условии, что оптические оси пластинок составляют угол 45° с осями поляроидов.

24.45. Между двумя скрещенными поляроидами находится кварцевый клин с преломляющим углом $3,5^\circ$. Оптическая ось клина параллельна его острому углу и составляет с главными направлениями поляроидов угол 45° . При прохождении через эту систему света с длиной волны $0,55$ мкм наблюдается система интерференционных полос, каждая из которых имеет ширину $1,0$ мм. Определите разность показателей преломления кварца для необыкновенного и обыкновенного лучей с указанными длинами волн.

24.46. 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?

24.47. Монохроматический свет, прошедший через поляризатор, падает параллельным пучком на поверхность немного замутненного водного раствора сахара. Раствор находится в прозрачном сосуде, и при наблюдении сбоку в нем видна темная винтообразная полоса с шагом $0,80$ м. Плотность раствора $1,32 \cdot 10^3$ кг/м³, постоянная вращения $0,87$ град·м²/кг. Объясните возникновение полос и определите, сколько сахара находится в 1 л воды.

24.48. Монохроматический пучок света проходит через ячейку Керра со скрещенными николями. Конденсатор заполнен сероуглеродом, длина пластин конденсатора 10 мм, расстояние между ними $2,2$ мм. Если на конденсатор подать напряжение $7,15$ кВ, яркость света, выходящего из анализатора, оказывается максимальной. Определите константу Керра для света данной частоты.

24.49. Монохроматический свет падает под углом $\alpha = 10^\circ$ на стеклянную пластинку шириной $d = 10$ мм. Противоположные грани пластинки посеребрены, по краям ее оставлены узкие непосеребренные полосы (рис. 24.2). Показатель преломления пластинки $1,74$, постоянная вращения для света — постоянная Верде — равна $1,34 \cdot 10^3$ град/(м·Тл). На какой угол повернется плоскость поляризации при наложении на пластинку магнитного поля с индукцией $0,5$ Тл?

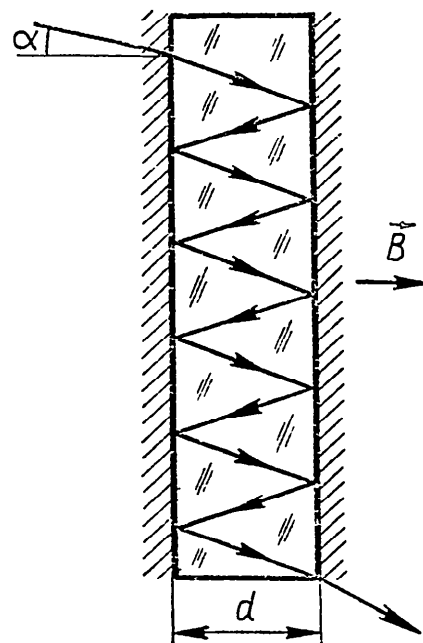


Рис. 24.2.

§ 25. Специальная теория относительности

25.1. Длина космического корабля, измеренная перед стартом, равна 10 м. Во сколько раз скорость корабля должна была бы превышать вторую космическую скорость, чтобы его длина в системе отсчета, связанной с Землей, изменилась на 1 мкм? Годовым и суточным вращением Земли пренебречь.

25.2. Ракета летит от Земли со скоростью $3 \cdot 10^4$ км/ч к ближайшей звезде, находящейся на расстоянии $4,3$ свет. года. Достигнув звезды, ракета возвращается обратно. На сколько отстанут от земных часы, установленные на ракете, за время полета?

25.3. В верхних слоях атмосферы рождаются мю-мезоны, имеющие скорость $0,99 c$. До распада мезоны успевают пролететь $5,00$ км. Чему равно время жизни мезона в системе отсчета, связанной с Землей, и в системе отсчета, связанной с самим мезоном? Чему

равна толщина слоя атмосферы, пройденного за время жизни мю-мезона в одной и другой системах отсчета?

25.4. В системе отсчета, связанной с неподвижной звездой, события A и B произошли на расстоянии $3 \cdot 10^6$ км друг от друга с интервалом времени 1,5 с. Существует ли такая инерциальная система, в которой: а) событие B произошло раньше события A ; б) оба события произошли в одном и том же месте? в) С какой скоростью и в каком направлении должна двигаться ракета, чтобы в связанной с ней системе отсчета оба события были одновременными?

25.5. Космонавт межпланетного корабля, летящего со скоростью v , произвел одновременно две вспышки в лобовой и хвостовой частях корабля. Длина корабля, определяемая космонавтом, равна l . Какой интервал времени между вспышками будет наблюдаться с Земли? С каким интервалом (в своей системе отсчета) космонавт должен произвести вспышки, чтобы наблюдателю на Земле они казались одновременными?

25.6. Две частицы, имеющие скорости c и v относительно системы отсчета, связанной с неподвижными звездами, летят по взаимно перпендикулярным направлениям. Какова скорость первой частицы в системе отсчета, связанной со второй?

25.7. Две одинаковые ракеты, длина которых в «собственной» системе отсчета l_0 , движутся равномерно навстречу друг другу с одинаковыми скоростями v относительно системы отсчета, связанной с неподвижной звездой. Чему равна скорость сближения ракет в системе отсчета звезды; в собственной системе отсчета? Какова будет длина одной ракеты в системе отсчета, связанной с другой?

25.8. Тело брошено под углом α к поверхности Земли со скоростью u . Проанализируйте движение тела в системе отсчета, которая перемещается относительно Земли со скоростью $v = 0,5c$ в направлении горизонтального полета тела.

25.9. Стекланный стержень длиной l движется со скоростью v в направлении источника света и затем с такой же скоростью удаляется от него. На сколько отличаются времена прохождения светом стержня в одном и в другом направлениях? Показатель преломления стекла n .

25.10. С космического корабля, летящего равномерно со скоростью v_0 , стартует ракета и движется относительно него с постоянным ускорением a . Через сколько времени наблюдатель, находящийся на Земле (в корабле), зарегистрирует скорость ракеты $v = 0,8c$? Сколько времени уйдет на это по часам, находящимся в ракете?

25.11. Космические протоны могут обладать кинетической энергией 10^{10} ГэВ. Определите массу и импульс этих протонов. Сравните эту массу с массой покоящегося протона.

25.12. Полагая, что электрон представляет собой шарик, равномерно заряженный по объему, оцените по порядку величины радиус электрона.

25.13. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы его продольный размер стал в k раз меньше поперечного?

25.14. Две частицы, имеющие заряд q и массу m , находятся на расстоянии r друг от друга. Чему будет равен максимальный импульс частиц, если их предоставить самим себе?

25.15. Протон начинает двигаться в однородном электрическом поле с напряженностью E . Учитывая релятивистское изменение массы, найдите, как будут меняться с течением времени скорость, пройденный путь и энергия протона. Через сколько времени кинетическая энергия протона станет равной его энергии покоя?

25.16. Релятивистский электрон, имеющий импульс p_0 , влетает в однородное электрическое поле перпендикулярно полю. На какой угол отклонится электрон от своего начального направления, пройдя разность потенциалов U ?

25.17. Релятивистский электрон движется равномерно по окружности радиусом 2,5 см в однородном магнитном поле с индукцией $5,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Определите скорость электрона и действующую на него силу.

25.18. Частица с массой покоя m_0 , имеющая скорость $v_1 = 0,8 c$, испытывает неупругое столкновение с такой же покоящейся частицей. Чему равна скорость и масса составной частицы? Решите задачу при условии, что вторая частица в момент удара имела скорость $v_2 = 0,4 c$ и летела: навстречу первой частице; в ту же сторону.

25.19. Частица, обладающая кинетической энергией $W = 2m_0c^2$, налетает на неподвижную частицу с той же массой покоя. Считая удар абсолютно упругим, определите суммарную кинетическую энергию частиц в системе их центра масс, импульс каждой частицы в этой системе, а также скорость центра масс относительно лабораторной системы.

25.20. Частота электромагнитных волн, излучаемых антенной передатчика, ν_0 . Какова частота принимаемого сигнала антенной приемника, если передатчик приближается к нему со скоростью v ; приемник приближается к передатчику со скоростью v ? Какой результат получился бы, если не учитывать замедление процессов в движущихся системах?

25.21. Радиолокатор работает на частоте 600 МГц. Определите скорость приближающегося самолета, если частота биений между сигналом передатчика и сигналом, отраженным от самолета в месте расположения локатора, равна 1,0 кГц.

25.22. Пучок света с интенсивностью I_0 и частотой ν_0 падает на плоское зеркало под углом $\alpha = 45^\circ$. Определите частоту и интенсивность отраженного света при условии, что зеркало движется навстречу световому пучку со скоростью v .

25.23. Спектральные линии далеких звезд периодически становятся двойными. Это позволяет предположить, что источником излучения служат две звезды, обращающиеся вокруг их центра масс. Зная, что максимальное расщепление спектральных линий $\Delta\lambda/\lambda =$

$= 1,2 \cdot 10^{-4}$ происходит через каждые 30 сут, оцените расстояние между звездами и их массу, предполагая, что обе звезды одинаковы.

25.24. Длина волны одной из линий солнечного спектра равна 0,590 мкм при наблюдении в направлении полюса Солнца. Если наблюдать эту же линию в направлении на край солнечного диска на экваторе, обнаруживается смещение на $4 \cdot 10^{-6}$ мкм. Радиус Солнца $7,0 \cdot 10^8$ м. Определите период вращения Солнца вокруг собственной оси.

25.25. При наблюдении вспыхнувшей звезды было обнаружено, что ее угловой диаметр α увеличивается со скоростью $d\alpha/dt = 0,3''$ $1/\text{год}$. Спектр звезды представлял обычный звездный спектр с дополнительными широкими линиями испускания, ширина которых оставалась постоянной и равной $\Delta\lambda = 10^{-3}$ мкм в области длин волн $\lambda = 0,500$ мкм. Ширину этих линий можно истолковать как меру доплеровского смещения между излучением частей оболочки, приближающейся к Земле и удаляющейся от нее. Оцените по этим данным расстояние R до новой звезды, полагая, что оболочка звезды оптически прозрачная и мы видим свет от ее ближнего и дальнего полушарий.

25.26. Газ, состоящий из атомов массой m , при достаточно высокой температуре испускает свет с частотой ν . Вследствие движения в направлении спектрометра, анализирующего излучение, наблюдается дисперсия света $|\Delta\nu|^2$. Оцените температуру газа, считая его идеальным, и укажите, каким образом по измерениям ширины спектральных линий $\Delta\nu = |\Delta\nu|$ можно определить температуру звезд.

§ 26. Квантовые свойства излучения

26.1. Оцените температуру поверхности Солнца, если известно, что расстояние от Земли до Солнца $1,5 \cdot 10^8$ км, радиус Солнца $6,9 \cdot 10^5$ км и солнечная постоянная $1,35$ кВт/м². Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно черного тела.

26.2. В спектре излучения огненного шара радиусом 100 м, возникающего при ядерном взрыве, максимум энергии излучения приходится на длину волны 0,289 мкм. Определите температуру поверхности шара; энергию, излучаемую поверхностью шара за время 10^{-3} с; максимальное расстояние, на котором будут воспламеняться деревянные предметы, если их поглощательная способность равна 0,7. Теплота воспламенения сухого дерева $5 \cdot 10^4$ Дж/м².

26.3. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум испускательной способности приходится на длину волны 0,480 мкм. Расстояние между Землей и Солнцем $1,5 \cdot 10^8$ км, радиус Солнца $6,9 \cdot 10^5$ км. Пренебрегая поглощением в атмосфере, определите мощность суммарного излучения Солнца; энергию, поступающую на 1 м² поверхности Земли; ежесекундное уменьшение массы

Солнца вследствие излучения; время, в течение которого масса Солнца уменьшится на величину массы Земли.

26.4. Волосок лампы накаливания, рассчитанной на напряжение 2 В, имеет длину 10 см и диаметр 0,03 мм. Полагая, что волосок излучает как абсолютно черное тело, определите температуру нити и длину волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения. Вследствие теплопроводности лампа рассеивает 8% потребляемой мощности, удельное сопротивление материала волоска $5,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

26.5. Определите поглощательную способность серого тела, имеющего температуру 10^3 К, если его поверхность 10^{-2} м² излучает за 1 мин энергию 13,4 кДж.

26.6. По тонкой нихромовой пластинке шириной 1 см и площадью поперечного сечения 0,001 см² идет ток. Коэффициент поглощения пластинки 0,34. При каком значении силы тока пластинка будет наиболее эффективным источником света, если максимальная чувствительность человеческого глаза соответствует электромагнитному излучению с длиной волны 0,550 мкм?

26.7. Оцените среднюю температуру поверхности земного шара, считая, что она излучает как абсолютно черное тело и энергия этого излучения находится в равновесии с получаемой от Солнца. Диаметр Солнца виден с Земли под углом 30', температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К. Приток теплоты от внутренних источников планеты не учитывать.

26.8. Земля, проходя афелий, находится на 3,3% дальше от Солнца, чем когда она проходит перигелий. Принимая земной шар за серое тело со средней температурой 288 К, определите разность температур, которые Земля имеет в этих положениях.

26.9. Небольшой абсолютно черный шарик диаметром d нагрет солнечными лучами. Какова установившаяся температура шарика, если на нем сфокусировать изображение Солнца посредством линзы, обладающей светосилой I ? Температура окружающей среды T_0 , солнечная постоянная k , угловой диаметр Солнца α . Поглощением света в линзе пренебречь. Рассмотрите случай, когда диаметр шарика меньше диаметра изображения.

26.10. Вольфрамовая нить лампы накаливания диаметром d и длиной l имеет температуру T_1 . По какому закону изменяется с течением времени температура нити после выключения тока? Всеми потерями энергии, кроме излучения, пренебречь. Поглощательная способность нити a , теплоемкость C .

26.11. На сколько градусов понизилась бы температура земного шара за столетие, если бы на Землю не поступала солнечная энергия? Радиус Земли принять равным $6,4 \cdot 10^6$ м, удельную теплоемкость 200 Дж/(кг·К), плотность 5500 кг/м³, среднюю температуру 300 К, коэффициент поглощения 0,8. За какое время температура понизилась бы на 27 К?

26.12. Температура вольфрамовой нити накала, измеренная оптическим пирометром со светофильтром, пропускающим излучение

с длиной волны $0,665$ мкм (яркостная температура), равна 2190 К. Коэффициент излучения нити $0,43$. Чему равна истинная температура нити? Яркостная температура тела равна температуре абсолютно черного тела, при которой монохроматическая яркость обоих тел одинакова.

26.13. Исходя из формулы Планка для спектральной объемной плотности энергии u_ν излучения абсолютно черного тела: а) получите приближенные выражения для функции u_ν , если $h\nu \ll kT$ (формула Рэля — Джинса) и $h\nu \gg kT$ (формула Вина); б) определите, в каких интервалах частот формулы Рэля — Джинса и Вина дают в значении u_ν погрешность, не превышающую 1% при температуре теплового излучения 2000 К; в) выведите законы Стефана — Больцмана и Вина.

26.14. Чему равен фототок с поверхности фотоэлемента, если на нее падает световой поток мощностью 1 мкВт и длиной волны $0,40$ мкм?

26.15. Точечный источник красного света ($\lambda_1 = 0,450$ мкм) излучает световой поток мощностью 10 Вт. На каком расстоянии можно заметить этот источник, если пороговая чувствительность глаза соответствует потоку из 60 фотонов/с желтого света ($\lambda_2 = 0,550$ мкм)? Диаметр зрачка принять равным $0,5$ см, поглощением света в воздухе пренебречь.

У к а з а н и е. При одинаковой мощности источников чувствительность глаза к желтому свету в 20 раз больше, чем к красному.

26.16. Фотоны обладают массой, и им присущи гравитационные свойства, поэтому при наблюдении на Земле излучения, идущего от звезд, спектральные линии смещаются к красной границе. Найдите: а) относительное уменьшение энергии фотона; б) гравитационное смещение длины волны излучения ($\Delta\lambda/\lambda$), испускаемого с поверхности Солнца; с поверхности нейтронной звезды, у которой масса равна массе Солнца и средняя плотность $8 \cdot 10^{15}$ кг/м³.

26.17. Атом тяжелого элемента, летящий со скоростью $v \ll c$, испускает фотон видимого света под углом $\alpha \ll \pi/2$ к направлению движения. Определите относительную величину доплеровского смещения частоты фотона. Решите задачу для релятивистского атома.

26.18. Параллельный пучок монохроматического света, поляризованного по кругу, падает по нормали на диск диаметром 5 мм и массой $0,1$ г. Мощность светового потока 100 Вт, длина волны падающего света $0,50$ мкм, диск может вращаться без трения вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости диска. Определите угловую скорость вращения диска после часового облучения.

26.19. Баллон электрической лампы мощностью 100 Вт представляет собой сферический сосуд радиусом 5 см. Стенки лампы отражают 10% падающего на них света. Полагая, что вся потребляемая мощность идет на излучение, определите давление света на стенки лампы.

26.20. Рубиновый лазер излучает в импульсе длительностью 0,1 мс энергию 10 Дж в виде узкого, почти параллельного пучка монохроматического света. Найдите среднее за время импульса давление пучка света, если его сфокусировать в пятнышко диаметром 10 мкм на поверхность, перпендикулярную пучку, с коэффициентом отражения 0,5.

26.21. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны 0,5 мкм падает нормально на зачерненную поверхность и производит давление 10^{-5} Па. Определите концентрацию фотонов в потоке и его интенсивность (число частиц, падающих на единичную поверхность в единицу времени).

26.22. Пренебрегая абсорбцией в атмосфере, оцените величину силы давления солнечного излучения на земной шар. Максимум энергии излучения Солнца приходится на длину волны 48 мкм. Угловой диаметр Солнца $30'$. Рассмотрите три случая: земная поверхность абсолютно черная; зеркальная с коэффициентом отражения 0,60; абсолютно отражающая, но матовая.

26.23. Какой диаметр должен иметь алюминиевый шарик, находящийся в космическом пространстве, чтобы его притяжение к Солнцу уравновешивалось силой светового давления солнечных лучей? Коэффициент отражения шарика 0,9. При решении задачи считать, что Солнце излучает как абсолютно черное тело, поверхность которого имеет температуру 6000 К.

26.24. Найдите давление теплового излучения во внутренних областях Солнца, где температура оценивается в $1,3 \cdot 10^6$ К. Сравните это давление с кинетическим давлением плазменного газа, полагая, что он целиком состоит из протонов и электронов и, считая, что газ подчиняется уравнению состояния идеальных газов. Плотность вещества в центре Солнца принимаем равной $8 \cdot 10^3$ кг/м³.

26.25. В центре тонкого кольца радиусом R , по которому равномерно распределен заряд с линейной плотностью τ , находится частица, имеющая массу m и заряд $-q$. Частицу смещают на расстояние $x \ll R$ и отпускают. Под действием кулоновских сил частица начинает совершать колебания. Чему равна мощность излучения такого осциллятора? Какова величина радиационного затухания колебаний (отношение энергии, излучаемой за одно колебание, к первоначальной энергии осциллятора)?

26.26. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка светом с длиной волны 0,25 мкм. Чему равна красная граница фотоэффекта?

26.27. Красная граница фотоэффекта у рубидия равна 0,81 мкм. Определите скорость фотоэлектронов при облучении рубидия монохроматическим светом с длиной волны 0,40 мкм. Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратился фототок? На сколько нужно изменить задерживающую разность потенциалов при уменьшении длины волны падающего света на 2 нм?

26.28. При некотором минимальном значении задерживающей разности потенциалов фототок с поверхности лития, освещаемого светом с частотой ν_0 , прекращается. Изменив частоту света в 1,5 раза, установили, что для прекращения фототока достаточно увеличить задерживающую разность потенциалов в 2 раза. Чему равна частота падающего света?

26.29. Уединенный железный шарик облучается монохроматическим светом длиной волны 2000 \AA . До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя фотоэлектроны?

26.30. Между точечной лампой и фотоэлементом на расстоянии 20 см от лампы помещена линза диаметром 10 см с оптической силой 5 дптр. Определите ток насыщения в цепи фотоэлемента, если чувствительность фотоэлемента 20 мкА/лм , рабочая площадь фотокатода 20 см^2 , сила света лампы 60 кд и коэффициент пропускания линзы 0,9. Сколько фотонов ежесекундно падает на катод?

26.31. Пороговое значение длины волны света, вызывающего фотоэффект на вольфраме, равно $0,2720 \text{ мкм}$. Чему равен максимальный поток электронов, испускаемый с площади 1 см^2 вольфрамовой пластинки при температуре 1770 К ? Постоянная в законе Ричардсона $1,2 \cdot 10^6 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$.

26.32. Электроды вакуумного фотоэлемента (один цезиевый, другой медный) замкнуты снаружи накоротко. Цезиевый электрод освещается монохроматическим светом. Найдите: а) длину волны света, при которой в цепи фотоэлемента появляется ток; б) максимальную скорость фотоэлектронов, подлетающих к медному электроду, если длина волны света $0,22 \text{ мкм}$; в) скорость фотоэлектронов при условии, что к электродам приложено ускоряющее напряжение 2 В .

26.33. При взаимодействии свободного электрона с квантом света длиной волны $0,1 \text{ \AA}$ комптоновское смещение оказалось равным $0,024 \text{ \AA}$. Определите угол рассеяния кванта; энергию рассеянного кванта; энергию, переданную электрону отдачи.

26.34. Фотон с энергией $0,46 \text{ МэВ}$ рассеялся под углом 120° на покоившемся свободном электроне. Найдите: а) энергию рассеянного кванта; б) относительное изменение частоты фотона; в) энергию, переданную электрону отдачи (поглощенную покоившимся электроном).

26.35. Фотон с энергией ϵ_1 , равной энергии покоя электрона, испытывает комптоновское рассеяние на свободном электроне. Определите: а) максимально возможное изменение длины волны фотона; б) максимальную энергию и импульс электрона отдачи; в) энергию и импульс электрона отдачи при условии, что фотон рассеивается на угол 90° .

26.36. На какой угол рассеялся γ -квант с энергией $0,8 \text{ МэВ}$ в результате столкновения с покоившимся электроном, если известно что: а) длина волны рассеянного кванта равна комптоновской длине волны электрона; б) скорость электрона отдачи составляет $0,6c$?

26.37. Покажите с помощью законов сохранения энергии и импульса, что свободный электрон не может: а) излучать энергию; б) поглотить квант.

26.38. При столкновении с релятивистским электроном фотон, обладающий энергией покоя электрона, рассеялся под углом 60° , а электрон остановился. Определите комптоновское смещение длины волны рассеянного кванта и кинетическую энергию электрона до столкновения.

26.39. Монохроматический пучок электромагнитных волн падает на тонкую металлическую фольгу, находящуюся в вакууме в однородном магнитном поле с индукцией $1,5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Радиус кривизны траектории электронов, выбитых из металла в плоскости, перпендикулярной полю, оказался равным 0,10 м. Определите длину волны падающего излучения, если длина волны, соответствующая работе выхода электронов из фольги, равна 0,15 Å.

26.40. Фотоэлектрический умножитель имеет катод с работой выхода электронов 1,5 эВ и 10 динодов, коэффициент вторичной эмиссии каждого из которых равен 6. При облучении катода монохроматическим светом с длиной волны 600 нм фототок коллектора (последнего катода) равен 6,05 мА. Чему равна мощность потока фотонов, падающих на катод?

§ 27. Атом Резерфорда — Бора

27.1. а) На какое расстояние приближается α -частица с кинетической энергией $W_0 = 0,96$ МэВ к покоящемуся ядру атома золота при рассеянии частицы на угол $\theta = \pi$ (лобовом соударении), на угол $\theta = \pi/2$? б) Чему равен прицельный параметр взаимодействия в первом и втором случаях? в) Чему равно приращение импульса рассеянной α -частицы? г) При каком значении W_0 это приращение будет максимальным, если прицельный параметр взаимодействия $b = 1,58 \cdot 10^{-13}$ м?

27.2. Узкий пучок α -частиц с энергией 1 МэВ и интенсивностью $3,6 \cdot 10^4$ частиц/с падает нормально на золотую фольгу толщиной 1 мкм. Сколько частиц рассеивается фольгой за 10 мин в интервале углов: а) $\theta > 60^\circ$? б) $\theta < 10^\circ$?

27.3. Для основного состояния атома водорода вычислите: а) радиус n -й боровской орбиты и скорость электрона на ней; б) кинетическую энергию и энергию связи электрона на этой орбите; в) первый потенциал ϕ возбуждения; г) индукцию магнитного поля в центре невозбужденного атома, обусловленную орбитальным движением электрона; д) отношение магнитного момента атома, обусловленного орбитальным движением электрона к его механическому моменту.

27.4. Между какими уровнями энергии атома водорода должен совершаться переход электрона для излучения фотона с длиной волны λ_1 ?

27.5. Зная максимальную длину волны спектральной линии серии Бальмера $\lambda = 0,656$ мкм, определите длины волн граничных линий в серии Лаймана и Пашена.

27.6. Длины волн головной линии серии Лаймана и границы серии Бальмера в спектре атомного водорода равны соответственно 1215 и 3650 Å. Определите по этим данным энергию ионизации невозбужденного атома водорода.

27.7. В пламени водорода находится $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов водорода при температуре 3000 К. Чему равна мощность излучения, если известно, что средняя продолжительность возбужденного состояния атомов водорода составляет 10^{-8} с и атомы находятся в основном или в первом возбужденном состоянии?

27.8. В результате захвата летящего электрона протоном образовался возбужденный атом водорода. При переходе атома в нормальное состояние был испущен фотон: а) частоты $5,8 \cdot 10^9$ МГц; б) с импульсом $1,28 \cdot 10^{-26}$ кг·м/с. Определите скорость электрона, которую он имел вдали от протона.

27.9. Атом водорода поглощает фотон, вследствие чего электрон, находившийся на второй боровской орбите, вылетает из атома со скоростью $6 \cdot 10^5$ м/с. Определите частоту фотона.

27.10. Атомарный водород возбуждается электронами, прошедшими ускоряющую разность потенциалов 12,5 В. а) Определите частоты фотонов, которые будут излучаться атомами водорода, находившимися перед возбуждением в основном состоянии. б) При каких скоростях электронов будут излучаться все спектральные линии водорода?

27.11. Вычислите энергию связи электрона в возбужденном состоянии атома водорода, если известно, что при переходе в основное состояние атом излучил: а) фотон с длиной волны $972,5 \text{ \AA}$; б) последовательно два фотона с длинами волн 6563 и 1216 \AA .

27.12. Во сколько раз изменяется момент импульса и энергия электрона атома водорода, находившегося в первом возбужденном состоянии при поглощении атомом кванта с импульсом $6,45 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с? На сколько изменится при этом орбитальный магнитный момент электрона? Какова кинетическая энергия электрона при возбуждении атома квантом с энергией 15 эВ?

27.13. Первоначально покоившийся атом водорода испускает фотон, соответствующий головной линии серии Лаймана. Определите: а) скорость, которую приобрел атом, перейдя в основное состояние; б) изменение длины волны фотона, вызванное отдачей атома.

27.14. Найдите для однозарядных ионов гелия: а) силу кулоновского взаимодействия между ядром и электроном; б) потенциал ионизации, соответствующий основному состоянию; в) первый потенциал возбуждения.

27.15. Какова должна быть минимальная скорость сближения атома водорода и однозарядного иона гелия, чтобы испущенный гелием фотон, соответствующий головной линии видимой части спектра, смог возбудить атом водорода из основного состояния?

У к а з а н и е. Нужно использовать точную формулу доплеровского эффекта.

27.16. Для дважды ионизированного иона лития вычислите: а) длину волны в спектре излучения, соответствующую переходу электрона с третьего на второй энергетический уровень; б) минимальную энергию кванта, необходимую для возбуждения полного спектра; в) скорость электрона на n -й орбите.

27.17. Позитроний, представляющий собой электрон и позитрон, обращающиеся вокруг общего центра масс частиц, находится

в состоянии с минимальной энергией. Чему равен: а) радиус борвской орбиты в позитронии; б) потенциал ионизации?

27.18. Мезоатом водорода состоит из протона и отрицательного мезона, имеющего массу $m_\mu = 207m_e$. Вычислите для мезоатома: а) расстояние между ядром и мезоном в основном состоянии; б) энергию связи и кинетическую энергию мезоатома в основном состоянии; в) длину волны фотона, испускаемого при переходе мезоатома из второго в первое возбужденное состояние.

§ 28. Волновые свойства частиц

28.1. Вычислите дебройлевскую длину волны: а) частицы массой 1 г, летящей со второй космической скоростью (11,2 км/с); б) электрона, имеющего импульс $8 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с.

28.2. На сколько нужно увеличить кинетическую энергию нерелятивистской частицы, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась вдвое? Вычислите это изменение для нерелятивистского электрона, имеющего $\lambda = 1$ А.

28.3. Определите теоретически возможную разрешающую способность электронного микроскопа с числовой апертурой 0,1 и ускоряющим напряжением 100 В.

28.4. Пучок электронов падает нормально на поверхность монокристалла никеля. В направлении, составляющем угол 55° с нормалью к поверхности, наблюдается максимум отражения четвертого порядка при скорости электронов $8 \cdot 10^6$ м/с. Пренебрегая преломлением электронных волн в кристалле, вычислите межплоскостное расстояние, соответствующее данному отражению.

28.5. Узкий пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов 10^4 В, пролетает через тонкую поликристаллическую алюминиевую фольгу и дает на экране дифракционную картину. Отражение третьего порядка от кристаллических плоскостей соответствует кольцу радиусом 1,6 см. Расстояние от фольги до экрана 10 см. Пренебрегая преломлением электронных волн в кристалле, определите постоянную решетки алюминия.

28.6. Пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов $U_0 = 100$ В, падает под углом $48,5^\circ$ на естественную грань монокристалла серебра. После зеркального отражения пучок электронов образует максимум третьего порядка. Определите внутренний потенциал U_i серебра, если известно, что постоянная кристаллической решетки для данного отражения 2,04 Å. Коэффициент преломления электронных волн в кристалле равен $n = \sqrt{1 + U_i/U_0}$.

28.7. Выведите зависимость длины волны де Бройля от ускоряющей разности потенциалов U релятивистской частицы. Вычислите длину для: а) электрона, прошедшего разность потенциалов 100 кВ; б) протона, обладающего кинетической энергией 70 ГэВ. При каких значениях кинетической энергии электронов ошибка в определении дебройлевской длины волны по нерелятивистским формулам не превышает 1%?

28.8. Какую кинетическую энергию нужно сообщить протону, чтобы его дебройлевская длина волны стала равной: а) 1 Å; б) комптоновской длине волны?

28.9. Исходя из принципа неопределенностей Гейзенберга, оцените: а) радиус первой боровской орбиты атома водорода; б) скорость электрона на этой орбите; в) минимальную ошибку, с которой можно определить эту скорость.

28.10. Исходя из принципа неопределенностей Гейзенберга, оцените: а) низший энергетический уровень (минимальную кинетическую энергию) электрона в атоме водорода (линейные размеры атома принять равными 10^{-10} м); б) неопределенность кинетической энергии нуклона в ядре (линейные размеры ядра принять равными 10^{-14} м).

28.11. Типичное время существования возбужденного состояния ядер имеет порядок 10^{-12} с. Какова неопределенность энергии γ -квантов, испускаемых ядрами?

28.12. Чему равна предельная резкость спектральной линии с длиной волны 5000 Å, допускаемая принципом неопределенностей, если считать, что средняя продолжительность возбужденного состояния атомов 10^{-8} с?

28.13. Вычислите с помощью соотношения неопределенностей энергию основного состояния позитрония и оцените минимальную ошибку, которую мы допускаем, определяя эту энергию. Среднее время жизни позитрония $1,25 \cdot 10^{-10}$ с.

28.14. Формула средней кинетической энергии молекул газа $\langle \epsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$ справедлива до тех пор, пока энергия теплового движения молекул значительно превосходит энергию их нулевых колебаний $\epsilon_0 = \frac{h\nu}{2}$ (минимальную энергию, которую могут иметь частицы, совершая гармонические колебания). Исходя из соотношения неопределенностей Гейзенберга, зная массу m молекулы и концентрацию молекул n : а) найдите температуру вещества, начиная с которой прямая пропорциональная зависимость между $\langle \epsilon \rangle$ и T нарушается (температуру вырождения); б) оцените температуру вырождения для паров гелия вблизи абсолютного нуля и температуру вырождения для электронного газа в металлах, если в них $n_{\text{He}} \approx 10^{27}$ и $n_e \approx 10^{29} \text{ 1/м}^3$.

§ 29. Рентгеновские лучи

29.1. Параллельный пучок монохроматических рентгеновских лучей падает на отражательную дифракционную решетку с периодом 1 мкм под углом скольжения $30'$. Определите длину волны лучей, если известно, что угол скольжения, соответствующий дифракционному максимуму второго порядка, равен 1° .

29.2. Монохроматическая рентгеновская волна, полученная от молибденового анода, работающего под напряжением 18 кВ, падает на кристалл поваренной соли, и отражение первого порядка от

атомных плоскостей кристалла происходит под углом $7^{\circ}5'$. Зная, что плотность соли 2165 кг/м^3 , вычислите постоянную решетки и число Авогадро.

29.3. Дифракция рентгеновских лучей наблюдается при их отражении от кристалла поваренной соли, измельченного в порошок. Узкий пучок рентгеновских лучей рассеивается слоем порошка в направлении к фотопластинке, установленной на расстоянии 10 см от слоя порошка. Напряжение на рентгеновской трубке 17,64 кВ. Расстояние между ионами Na и Cl решетки элементарных кристаллов $2,81 \text{ \AA}$. Определите расстояние между двумя наиболее яркими кольцами первого порядка, получившимися на пластинке вследствие дифракции.

29.4. В рентгеновском спектрометре для опытов с комптон-эффектом используется кристалл KCl, у которого постоянная решетки $3,14 \text{ \AA}$. На какой угол сместится отражение первого порядка при облучении кристалла рентгеновской волной с длиной $0,71 \text{ \AA}$, если угол рассеяния 90° ?

29.5. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке от 16 до 24 кВ длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра изменилась на $0,26 \text{ \AA}$. Определите по этим данным числовое значение постоянной Планка.

29.6. С какой скоростью подлетают электроны к антикатоде рентгеновской трубки, если длина волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра оказывается равной $0,157 \text{ \AA}$?

29.7. Определите скорость релятивистских электронов, вырванных с L-слоя атома молибдена при освещении рентгеновскими лучами с длиной волны $0,2 \text{ \AA}$. Длина волны линии молибдена $5,395 \text{ \AA}$.

29.8. Принимая поправку на экранизацию электронов атома молибдена равной 0,5, вычислите длину волны K_{α} излучения, испускаемого рентгеновской трубкой с молибденовым антикатодом.

29.9. С помощью закона Мозли определите: а) энергию фотона, соответствующего K_{α} -линии характеристического рентгеновского спектра, излучаемого вольфрамом при бомбардировке его быстрыми электронами; б) разность энергий связи K_{α} и L_{α} электронов ванадия.

29.10. Разность длин волн между K_{α} -линией и коротковолновой границей сплошного рентгеновского спектра равна $0,84 \text{ \AA}$. Чему равно напряжение на рентгеновской трубке с никелевым антикатодом?

29.11. При увеличении напряжения на рентгеновской трубке от 10 до 20 кВ интервал длин волн между K_{α} -линией и коротковолновой границей увеличивается в 3 раза. Из какого металла сделан антикатод трубки?

§ 30. Строение ядра

30.1. Исходя из того, что радиус ядра достаточно точно удовлетворяет эмпирической зависимости $R = 1,5 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$ м, оцените плотность ядерного вещества и концентрацию нуклонов в ядрах.

30.2. По нормали к медной фольге толщиной $1,5 \cdot 10^{-2}$ кг/м² падает узкий пучок α -частиц, обладающих энергией 5,29 МэВ. На углы $\theta > 6^\circ$ рассеивается около 1% всех α -частиц. Определите по этим данным число протонов в ядре меди.

30.3. При бомбардировке ядер урана α -частицами с энергией 8,8 МэВ было обнаружено, что α -частицы рассеиваются в соответствии с формулой Резерфорда. Оцените по этим данным верхний предел радиуса и плотность ядра урана.

30.4. Вычислите энергию связи ядра ${}^{10}_5\text{B}$ и сравните ее с электростатической энергией взаимодействия протонов, полагая, что они равномерно распределены по объему сферы радиусом 10^{-15} м.

30.5. Зная, что энергия связи дейтона 2,19 МэВ, определите атомную массу дейтона, дейтерия и электрона.

30.6. Вычислите с помощью табличных значений масс атомов: а) энергию связи нейтрона и α -частицы в ядре ${}^{21}_{10}\text{Ne}$; б) энергию, необходимую для разделения ядра ${}^{16}_8\text{O}$ на четыре α -частицы.

30.7. Ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ захватывает тепловой нейтрон. Найдите энергию возбуждения ядра ${}^{236}_{92}\text{U}$.

30.8. Какую энергию необходимо затратить для разделения ядра ${}^9_4\text{Be}$ на две α -частицы и нейтрон, если известно, что энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре бериллия, равна 6,45 МэВ, а в ядре гелия 7,06 МэВ?

30.9. Энергия связи ядер ${}^{13}_7\text{N}$ и ${}^{14}_7\text{N}$ равна соответственно 94,10 и 104,66 МэВ. Чему равна энергия связи нейтрона в ядре ${}^{14}_7\text{N}$?

30.10. Какая энергия выделяется при образовании килоатома гелия из дейтонов, если удельная энергия связи нуклонов в дейтоне 1,09 МэВ/нуклон, а в ядре гелия 7,06 МэВ/нуклон?

§ 31. Закон радиоактивного распада

31.1. Сколько β -частиц испускает за сутки 1 мкг радиоизотопа фосфора ${}^{32}_{15}\text{P}$?

31.2. В откачанной ампуле объемом $3 \cdot 10^{-6}$ м³ содержится 5×10^{-3} кг радия в течение 1 года. При температуре 300 К гелий,

образовавшийся в результате распада радия, производит давление $2,62 \cdot 10^3$ Па. Чему равна постоянная распада радия?

31.3. Какая часть первоначального количества ядер ^{90}Sr останется через 10 лет? Каков заряд всех частиц, испущенных стронцием за это время, если масса исходного препарата 1 г?

31.4. Определите массу ^{206}Pb образовавшегося из одной тонны урана за время, равное геологическому возрасту Земли ($2,5 \cdot 10^9$ лет). При решении считать, что весь свинец получается в результате распада урана и его продуктов.

31.5. Зная период T полураспада ядра, определите вероятность распада ядра за промежуток времени t и его среднее время жизни τ .

31.6. Сколько процентов начального количества радиоактивного изотопа распадается за среднее время жизни изотопа?

31.7. Поток монохроматических μ -мезонов, родившихся на высоте 3000 м над уровнем моря, летит вертикально вниз. Энергия μ -мезонов и их среднее время жизни в системе, где мезоны покоятся, равны соответственно 0,42 ГэВ и 2,2 мкс. Полагая, что ослабление мезонного потока происходит только за счет их естественного распада, определите, во сколько раз уменьшается интенсивность потока мезонов, достигающих поверхности Земли.

31.8. Сосуд емкостью 10^{-3} м³, откачанный до высокого вакуума, помещен в изотропное поле тепловых нейтронов, поток которых составляет 10^{12} нейтронов/(м²·с). Оцените массу водорода, накопившегося в этом сосуде за 3 месяца в результате распада нейтронов. Период полураспада нейтрона принять равным 12 мин, а распределение нейтронов по скоростям — близким к максвелловскому. Температура окружающей среды 300 К.

31.9. Вычислите удельную активность радия ^{226}Ra . Какова активность препарата радия массой 1 г? Сколько периодов полураспада должно пройти, чтобы активность радия уменьшилась в 10 раз?

31.10. При распаде 1 г ^{238}U выделяется примерно $1,24 \cdot 10^4$ α -частиц в секунду. Определите по этим данным период полураспада этого изотопа урана и его активность.

31.11. В калориметр с теплоемкостью 4,19 Дж/К поместили препарат полония с активностью $7,4 \cdot 10^8$ расп/с. Вследствие α -распада температура калориметра стала повышаться со скоростью 0,54 К/ч. Определите по этим данным энергию α -частиц.

31.12. Древесный уголь, обнаруженный на стоянке древнего человека, содержит радиоизотоп ^{14}C , при жизни усвоенный растением. Удельная активность угля 10 л/(мин·г), эта же активность в живом дереве 15,3 л/(мин·г). Сколько времени прошло с момента прогорания костра древнего человека?

31.13. В верхнем слое поверхности Земли на каждом квадратном километре содержится в среднем 3100 кг ^{238}U и 4600 кг ^{232}Th . Чему равна активность верхнего слоя Земли в расчете на 1 м³ почвы?

31.14. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего радиоизотоп ^{24}Na с активностью $1,2 \cdot 10^5$ расп/с. Удельная активность крови, взятой через 5 ч после инъекции, оказалась

равной $1,6 \cdot 10^7$ расп/(с · м³). Определите по этим данным объем крови человека.

31.15. Определите максимальную активность ^{222}Rn , находящегося при нормальных условиях в ампуле объемом 1 см³.

31.16. Через сколько времени активности препаратов ^{198}Au и ^{116}In будут отличаться в 10 раз, если начальные количества золота и индия были одинаковыми?

31.17. При облучении ^{27}Al нейтронами в реакторе образуется бета-активный изотоп ^{28}Al с периодом полураспада 2,3 мин. а) Какое максимальное количество радиоактивного алюминия можно получить в реакторе и какова его активность, если ядра ^{28}Al возникают с постоянной скоростью 10^{10} ядер/с? В начальный момент времени образец содержал только ядра легкого изотопа алюминия. б) Через сколько времени активность достигнет 95% максимальной активности?

31.18. Полагая, что стабильный изотоп свинца в урановой руде получается в результате радиосактивных превращений ^{238}U , оцените: а) каким было отношение массы свинца к массе урана миллиард лет назад; б) чему равно это отношение в наше время, если геологический возраст Земли считать равным $2,5 \cdot 10^9$ лет.

31.19. При распаде известного радиоактивного изотопа с периодом полураспада T_1 образуется радиоизотоп с периодом полураспада T_2 . Считая, что в начальный момент препарат содержал только ядра материнского изотопа и масса его равна m , найдите закон накопления дочернего радиоизотопа с течением времени. Через сколько времени активность дочернего радиоизотопа достигнет максимума?

31.20. Из какого наименьшего количества руды, содержащей 18% урана, можно получить 1 г радия?

31.21. В запаянную ампулу был введен ^{222}Rn с активностью $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с. Через два года радон распался и из него образовался радиоактивный изотоп ^{210}Pb , распадающийся по схеме $^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb}$ (стабилен). Определите активность полония. Постоянные распада радона, изотопа свинца и полония равны соответственно $1,94 \cdot 10^{-6}$, 10^{-9} и $5,8 \cdot 10^{-8}$ 1/с.

31.22. 1 г радиоактивного изотопа ^{118}Cd распадается по схеме $^{118}\text{Cd} \rightarrow ^{118}\text{In} \rightarrow ^{118}\text{Sn}$ (стабилен). Зная периоды полураспада изотопов кадмия и индия, определите: а) массу олова, образовавшегося за 1 ч, полагая, что в начальный момент препарат содержал только кадмий; б) активность препарата спустя это время.

§ 32. Ядерные реакции

32.1. При распаде покоившегося ядра ^{226}Ra образуются невозбужденное ядро ^{222}Rn и частица. Запишите реакцию распада. Определите кинетическую энергию и импульс продуктов распада радия, если при распаде выделяется энергия 4,88 МэВ. Начальным импульсом ядра радия пренебречь.

32.2. Первоначально покоившиеся ядра ^{210}Po испускают α -частицы с кинетической энергией $5,3 \text{ МэВ}$, причем практически все дочерние ядра оказываются невозбужденными. Определите количество теплоты, которое выделяет препарат ^{210}Po массой 1 г : за 24 ч ; за время τ , равное среднему времени жизни ядер.

32.3. Нерелятивистская частица массой m , обладающая кинетической энергией W и положительным зарядом, испытала лобовое упругое соударение с первоначально покоившимся ядром массой M . Найдите: а) кинетические энергии и импульсы частицы и ядра после соударения в лабораторной системе отсчета и в системе центра масс частиц; б) соотношение масс m и M , при котором потеря кинетической энергии налетающей частицы наибольшая; в) минимальное расстояние x , на которое частица приближается к ядру. Проведите числовой расчет для случая, когда α -частица с энергией $W = 1 \text{ МэВ}$ налетает на ядро ${}^6_3\text{Li}$.

32.4. неподвижная водородная мишень бомбардируется протонами, разогнанными до кинетической энергии W . Какая энергия протона может быть использована для реакции образования новых частиц? Проведите числовой расчет, полагая: а) $W = 200 \text{ МэВ}$ (нерелятивистский протон); б) $W = 50 \text{ ГэВ}$ (релятивистский протон).

32.5. Реакции, вызванные столкновением встречных пучков протонов, энергетически являются более выгодными, чем те же реакции, происходящие при бомбардировке протонами неподвижных водородных мишеней. Предположим, что два протона, ускоренные до кинетической энергии 10 ГэВ , движутся навстречу друг другу и сталкиваются. Какую кинетическую энергию нужно сообщить одному протону, чтобы при столкновении с неподвижным были возможны те же процессы, что и в первом случае?

32.6. В 1932 г. Чадвик, исследуя нейтральное, сильно проникающее излучение бериллия, возникающее после облучения α -частицами полония, обнаружил, что оно дает в водороде протоны отдачи с максимальной кинетической энергией $5,7 \text{ МэВ}$, а в азоте ионы отдачи с максимальной кинетической энергией $1,2 \text{ МэВ}$. Исходя из законов сохранения, покажите, что неизвестное излучение не могло быть потоком γ -лучей. Чадвик предположил, что это излучение является потоком незаряженных частиц-нейтронов и рассчитал их массу, считая соударения нейтронов с ядрами водорода и азота упругими. Чему оказалась равной масса нейтрона?

32.7. Происходит упругое взаимодействие нерелятивистской заряженной частицы массой m с первоначально неподвижным ядром массой M . Перед соударением частица имела кинетическую энергию W , после удара ядро отдачи полетело под углом θ к начальному направлению частицы. Найдите: а) прицельный параметр взаимодействия; б) кинетическую энергию ядра отдачи; в) условие, при котором эта энергия будет максимальной; г) часть x кинетической энергии, которую теряет частица при ударе. При каких условиях x будет наибольшим? Проведите численные расчеты для протона с энергией $W = 0,13 \text{ МэВ}$, рассеянном на ядре ${}^4\text{He}$ и $\theta = 60^\circ$.

32.8. При бомбардировке неподвижных ядер некоторого элемента α -частицами с энергией W_α вылетают протоны с энергией W_p под углом θ к направлению движения α -частицы и образуется ядро с массой M . Определите энергию реакции. Проведите числовой расчет для случая, когда ядром-мишенью является азот ^{14}N , $W_\alpha = 4 \text{ МэВ}$, $W_p = 2,09 \text{ МэВ}$, $\theta = 60^\circ$.

32.9. Энергия возбуждения ядра массой m равна ΔE . Полагая ядро неподвижным, определите частоту излучаемого γ -кванта.

32.10. Возбужденное ядро ^{69}Zn переходит в основное состояние, испуская γ -квант с энергией $0,436 \text{ МэВ}$. Вычислите кинетическую энергию ядра отдачи цинка после испускания кванта и энергию возбужденного ядра.

32.11. ^{235}U возникает при α -распаде ^{239}Pu . а) Какая энергия выделяется при распаде 10^{-3} кг чистого ^{239}Pu ? б) Какое количество чистого изотопа ^{239}Pu нужно взять, чтобы эта энергия выделялась за 1 с ?

32.12. Определите с помощью табличных значений масс атомов тепловые эффекты следующих реакций: $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$, $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + n$.

32.13. При электронном β -распаде неподвижного ядра трития возникает легкий изотоп гелия и нейтрино. Зная массы нейтральных атомов обоих изотопов и среднюю энергию электронов распада $5,69 \text{ кэВ}$, определите граничную энергию спектра трития; среднюю энергию нейтрино; максимальную энергию дочернего ядра.

32.14. Свободный нейтрон, обладающий ничтожной скоростью, распадается на протон, электрон и антинейтрино. Вычислите: а) суммарную кинетическую энергию частиц; б) кинетическую энергию протона, если угол разлета электрона и антинейтрино оказался равным 60° , а их энергии — одинаковыми; в) кинетическую энергию протона при возникновении электрона с ничтожно малым импульсом.

32.15. При облучении дейтерида лития (LiD) потоком медленных нейтронов получается тритий T в реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$. Ядра трития возбуждают реакции $\text{D}(\text{T}, n){}^4\text{He}$, которые являются мощными источниками быстрых нейтронов. Определите максимальные кинетические энергии этих нейтронов, если тепловые эффекты каждой из проведенных реакций равны соответственно $4,8$ и $17,6 \text{ МэВ}$.

У к а з а н и е. Пренебрегая кинетической энергией медленных нейтронов, необходимо сначала определить кинетическую энергию возникающих тритонов.

32.16. Реакцию расщепления $\text{Li}(p){}^2\text{He}$ могут вызвать сравнительно медленные протоны (с энергией порядка десятков килоэлектрон-вольт). Энергии связи на один нуклон в ядрах ${}^7\text{Li}$ и ${}^4\text{He}$ равны соответственно $5,60$ и $7,06 \text{ МэВ}$. а) Определите по этим данным тепловой эффект реакции, а также кинетическую энергию α -частиц. б) Каков угол разлета α -частиц одинаковых энергий, если реакция расщепления $\text{Li}(p){}^2\text{He}$ вызвана протонами с кинетической энергией $20,7 \text{ МэВ}$?

32.17. В радиево-бериллиевом источнике нейтронов происходят реакции ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^6_3\text{C}$. Энергия α -частиц, выбрасываемых радием, 5,68 МэВ, энергия, выделяемая в процессе захвата, 5,75 МэВ. Определите максимальную кинетическую энергию вылетающих нейтронов.

32.18. Определите минимальную кинетическую энергию нейтрона, возникающего в результате реакций: ${}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}^{235}\text{U} + {}^4_2\text{He} + 5,22 \text{ МэВ}$, ${}^4_2\text{He} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n - 2,79 \text{ МэВ}$.

32.19. Чтобы частица массой m могла проникнуть в покоящееся ядро массой M и возбудить эндотермическую ядерную реакцию, кинетическая энергия частицы должна быть не меньше пороговой. а) Используя законы сохранения, найдите связь между пороговой энергией $E_{\text{пор}}$ частицы и энергией ядерной реакции Q . б) Вычислите пороговую энергию налетающей частицы в реакции $\text{H}(t, n){}^3\text{He}$ (ядра трития бомбардируют неподвижную водородную мишень). в) Какую энергию будут иметь нейтрон и ядро гелия, возникающие в этой реакции?

32.20. Под воздействием γ -квантов с частотой $6,35 \cdot 10^{14} \text{ МГц}$ происходит разрушение (фоторасщепление) дейтронов на протон и нейтрон. Пренебрегая импульсом γ -кванта, найдите энергию нейтрона и протона.

32.21. Найдите пороговую энергию γ -кванта, при которой становится возможной эндотермическая реакция фоторасщепления покоящегося ядра массой M , если энергия реакции равна Q .

32.22. В результате захвата K -электронов изотопом ${}^7\text{Be}$ происходит реакция ${}^7\text{Be} + e \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$, причем ядро лития оказывается в невозбужденном состоянии. Найдите кинетическую энергию ядра Li и нейтрино, если энергия реакции 0,87 МэВ.

32.23. Составные ядра, возникающие при захвате нейтронов изотопом ${}^{238}\text{U}$, испытывают деление лишь в том случае, если энергия бомбардирующих нейтронов $W_n \geq 1,4 \text{ МэВ}$. Чему равна энергия активации делящихся ядер?

32.24. При расщеплении ядра ${}^{235}\text{U}$ под действием медленных нейтронов типичные ядра-осколки имеют массовые числа $A_1 = 150$ и $A_2 = 83$, на долю которых приходится энергия 160 МэВ. Найдите скорость осколков деления.

32.25. Одна из типичных реакций деления, протекающих при захвате ядром ${}^{235}\text{U}$ медленного нейтрона, происходит по следующей схеме: $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 2n$. Оцените энергию, которая выделяется при этой реакции: а) по изменению энергии электрического поля, рассматривая ядра атомов как шары, заряд которых равномерно распределен по их объему, а радиус связан с атомной массой соотношением $1,4 \cdot \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15} \text{ м}$; б) по изменению энергии связи. Удельная энергия связи ядра урана 7,6 МэВ/нуклон, удельная энергия связи ядер со средними массовыми числами составляет около 8,5 МэВ/нуклон. Оцените энергию, выделяющуюся при полном делении 1,0 кг урана, и количество тротила с теплотой сгорания $4,13 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$, эквивалентное в тепловом отношении этому урану.

32.26. Эффективное сечение реакции деления естественного урана тепловыми нейтронами 4,22 барн. Определите эффективное сечение этой реакции для чистого ^{235}U . Изотоп ^{235}U содержится в естественном уране в смеси с изотопом ^{238}U в количестве 0,720%. Тяжелый изотоп урана медленными нейтронами не делится.

32.27. Тонкая пластинка ^{113}Cd облучалась потоком тепловых нейтронов интенсивностью 10^{16} нейтрон/(с·м²). Найдите эффективное сечение реакции ($n\cdot\gamma$), если за 6 сут. облучения содержание ядер изотопа кадмия уменьшилось на 1%.

32.28. Медную мишень толщиной 0,1 см бомбардируют медленными нейтронами. Определите среднее эффективное сечение реакции, если известно, что ее выход составляет 0,94.

32.29. При облучении углерода потоком дейтронов возбуждаются ядерные реакции $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$. Изотоп азота ^{13}N является β -активным элементом с периодом полураспада 10,08 месяцев. Эффективное сечение реакции 10^{-2} барн. Какова будет β -активность препарата, если потоком дейтронов при токе дейтронного пучка 200 мкА в течение 10 мин облучать угольную пластинку толщиной 0,1 мм?

32.30. При облучении тонкого слоя ^{23}Na потоком тепловых нейтронов интенсивностью I образуется радиоизотоп ^{24}Na с периодом полураспада T . Масса исходного изотопа m , эффективное сечение захвата нейтронов ядрами ^{23}Na равно σ . а) Установите закон накопления радиоизотопа натрия. б) Определите время облучения τ , по истечении которого активность образца станет максимальной. в) Чему равна активность образца при насыщении?

32.31. Оцените минимальную температуру дейтериевой плазмы, полагая, что дейтроны обладают одинаковыми скоростями, равными наиболее вероятным при этой температуре.

32.32. Какая энергия выделяется при полном сгорании 10^{-3} кг дейтерия в процессе термоядерной реакции: $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He} + n$. Какая энергия приходится в этой реакции на долю нейтронов? Сравните энергию, выделяемую при данной термоядерной реакции, с энергией деления ^{235}U , имеющего массу 10^{-3} кг. При делении одного ядра урана освобождается энергия 200 МэВ.

32.33. В среднем примерно на каждые 6000 молекул обычной воды приходится одна молекула тяжелой воды D_2O . Какая энергия выделяется при синтезе всего дейтерия, содержащегося в 1 кг воды? При расчете считать, что все возможные реакции с дейтерием $\text{D}(\text{D}, p)\text{T}$; $\text{D}(\text{D}, n)^4\text{He}$; $\text{T}(\text{D}, n)^4\text{He}$; $^3\text{He}(\text{D}, p)^4\text{He}$ протекают в дейтериевой плазме равновероятно.

32.34. Основным источником солнечного излучения являются термоядерные реакции, происходящие в глубинах Солнца. С достаточно хорошим приближением можно считать, что в результате этих реакций происходит превращение водорода в гелий по схеме $4p + 2e \rightarrow ^4\text{He} + 2\gamma + 26,2$ МэВ. Зная также, что $z = 5/6$ от общего количества частиц Солнца приходится на протоны, $1/6$ — на ядра гелия и что толщина слоя фотосферы (слоя, из которого излучается большая часть энергии Солнца) $h = 10^3$ км, определите:

на какое время хватит ядерных запасов Солнца при неизменной мощности излучения; мощность потока лучистой энергии, поступающей на поверхность Земли. Масса и радиус Солнца соответственно равны $2 \cdot 10^{30}$ кг и $7 \cdot 10^5$ км, расстояние от Солнца до Земли $1,5 \cdot 10^8$ км, температура поверхности Солнца 5800 К.

32.35. В результате аннигиляции позитрона и покоящегося электрона возникли два γ -кванта одинаковой частоты, разлетевшиеся под углом $\varphi = \frac{2}{3}\pi$. Какова была кинетическая энергия позитрона?

32.36. Какой минимальной энергией E_γ должен обладать γ -квант для образования электронно-позитронной пары в поле первоначально неподвижного ядра массой M ? Чему равна при этом суммарная кинетическая энергия W частиц пары и ядра? Вычислите E_γ и W , полагая M равной массе ядра водорода.

32.37. Определите пороговую кинетическую энергию протона, необходимую для рождения: а) π -мезона при столкновении протона с протоном; б) пары протон — антипротон в поле первоначально покоившегося протона.

32.38. Отрицательный μ -мезон с кинетической энергией 100 МэВ испытывает упругое лобовое соударение с неподвижным электроном. Найдите кинетическую энергию электрона отдачи.

32.39. При распаде на лету нейтрального π -мезона образуются два одинаковых γ -кванта, разлетающихся под углом 60° . Определите энергию возникающих γ -квантов; кинетическую и полную энергию пиона.

32.40. Остановившийся мюон распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. Каковы максимальные значения кинетической энергии и импульса электрона?

32.41. Пион, обладающий кинетической энергией 50 МэВ, распадается на мюон и нейтрино. Определите: а) энергию нейтрино, вылетевшего под прямым углом к направлению движения π -мезона; б) кинетическую энергию и направление движения μ -мезона.

32.42. Антипротон после остановки поглощается дейтоном. Одна из возможных реакций: $\bar{p} + D \rightarrow n + \pi^0$. Чему равна полная энергия рожденного π^0 -мезона?

§ 33. Экспериментальные методы ядерной физики

33.1. Сколько слоев половинного ослабления имеет пластинка, уменьшающая интенсивность узкого пучка монохроматических рентгеновских лучей в 10^3 раз?

33.2. Вычислите, во сколько раз ослабляет интенсивность проникающей радиации укрытие, имеющее бревенчатый накат толщиной 0,30 м и слой грунта толщиной 0,70 м. Толщина слоя половинного ослабления в дереве и грунте равны соответственно 0,25 и 0,14 м.

33.3. Узкий пучок тепловых нейтронов после прохождения кадмиевой пластинки толщиной 0,50 мм оказался ослабленным в 360 раз. Определите эффективное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами кадмия.

33.4. На расстоянии 0,1 м от точечного источника γ -излучения мощность дозы составляет 0,2 Р/мин. а) На каком минимальном расстоянии от источника доза излучения за шестичасовой рабочий день не превысит предельно допустимую $D_0 = 0,02$ Р? Поглощением γ -излучения в воздухе пренебречь. б) Сколько времени можно находиться без защиты на расстоянии $x/2$ от источника?

33.5. Нормальная концентрация радиоактивных веществ в воздухе составляет 10^{-10} Ки·м⁻³. Сколько радиоактивного ⁸⁹Sr можно держать в помещении объемом 1000 м³, чтобы концентрация радиоактивных продуктов не превышала предельно допустимой для живой ткани величины 10^{-9} Ки·м⁻³? Период полураспада стронция 53 сут.

33.6. Около 20% энергии термоядерного взрыва приходится на долю радиоактивного излучения. В каком весовом количестве воздуха взрыв бомбы 10 Мт при полном поглощении радиации воздухом может создать среднюю дозу $D = 500$ Р? Теплота сгорания тротила $4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг.

33.7. Точечный источник γ -излучения ⁶⁰Co находится в центре сферического свинцового контейнера с толщиной стенок 10^{-2} м и наружным радиусом 0,2 м. Активность препарата $3,7 \cdot 10^6$ расп/с, линейный коэффициент ослабления свинца для γ -излучения 64 л/м. а) Чему равна интенсивность потока γ -лучей на расстоянии 5 м от контейнера? б) На каком расстоянии мощность излучения не будет превышать предельно допустимую $P = 2,8$ мР/ч, если энергия γ -квантов 2 МэВ и выход их 2 кванта/распад?

33.8. При облучении биологической ткани потоком α -частиц с кинетической энергией 4,4 МэВ каждый грамм ткани получил дозу $D = 50$ бэР. Полагая, что для α -частиц относительная биологическая эффективность (отношение $D_{бэР}/D_{рад}$) равна 10, найдите число частиц, поглощенных тканью массой 1 г.

33.9. В организм человека массой 80 кг попало 2 мкг ⁹⁰Sr. Средняя энергия β -частиц, испускаемых при распаде Sr, равна 0,6 МэВ. Эффективный период полураспада стронция в организме $3 \cdot 10^8$ с. Какую дозу радиации получит человек в течение 10 лет?

33.10. Интенсивность потока γ -квантов с энергией 1 МэВ равна $4 \cdot 10^7$ квант/(м²·с). Этот поток создает мощность дозы $P = 8,35 \cdot 10^{-3}$ Р/ч. Определите коэффициент поглощения γ -излучения в воздухе, если для создания пары ионов в воздухе необходима энергия 33 эВ.

33.11. В центре шарового слоя графита, внутренний и внешний радиусы которого равны 1 и 10 см, находится точечный источник монохроматических нейтронов с энергией 2 МэВ и интенсивностью 10^5 1/с. Полное эффективное сечение ядер углерода для нейтронов данной энергии составляет 1,6 барн. Определите плотность потока

нейтронов на внешней поверхности графита, проходящих данный слой без столкновения с ядрами углерода.

33.12. Для получения пучка моноэнергетических нейтронов применяется «механический селектор скоростей», состоящий из двух дисков, покрытых слоем кадмия с узкими прорезями. Диски укреплены на быстровращающемся валу так, что щель второго диска оказывается сдвинутой на 20° по отношению к прорези первого. С какой скоростью нужно вращать диски, чтобы селектор пропускал только тепловые нейтроны? Расстояние между дисками 1 м, кинетическая энергия тепловых нейтронов соответствует температуре 300 К.

33.13. Для отбора медленных нейтронов одинаковой скорости используют метод отражения от поверхности кристалла. Под каким углом скольжения будут отражаться в первом порядке спектра нейтроны, обладающие кинетической энергией 1,0 эВ, если в качестве отражателя применять кристалл фтористого кальция, у которого расстояние между соседними плоскостями кристаллической решетки $3 \cdot 10^{-10}$ м?

33.14. Импульс света в сцинтилляционном счетчике регистрируется фотоумножителем с коэффициентом умножения $2 \cdot 10^6$. Емкость анода по отношению к Земле 10 пкФ. Сколько электронов было выбито из фотокатода, если импульс на выходе фотоумножителя оказался равным 16 В.

33.15. Небольшой образец, содержащий ^{226}Ra , расположен на расстоянии 0,3 м от круглого флюоресцирующего экрана диаметром 2 мм. Определите количество радия в образце, если на экране за каждые 10 с появляются 3 вспышки.

33.16. Объем ионизационной камеры индивидуальных дозиметров равен 4 см^3 , емкость 12 пкФ. Под действием γ -излучения напряжение на электродах камеры упало со 120 до 60 В. Чему равна доза излучения, прошедшего через камеру?

33.17. Цилиндрическая ионизационная камера радиусом 0,20 м и высотой 0,30 м наполнена водородом при давлении $5 \cdot 10^5$ Па. Камера расположена вертикально. При облучении камеры потоком космических мезонов в ней возникает ток $4,2 \cdot 10^{-12}$ А. Определите величину потока мезонов, если известно, что на пути 0,010 м в воздухе при нормальном атмосферном давлении каждый мезон создает 85 пар протонов.

33.18. В газоразрядной трубке, заполненной воздухом, в качестве ионизатора используется радон с активностью $1,85 \cdot 10^7$ расп/с. Сколько ионов порождает каждая α -частица, выбрасываемая радонном, если ток насыщения в трубке 0,46 мкА? Ионы считать однозарядными.

33.19. Ток насыщения в ионизационной камере, расположенной в однородном поле γ -излучения, равен 10^{-9} А. Камера имеет объем 50 см^3 и наполнена воздухом под давлением 2 Па при температуре 300 К. Какова мощность дозы облучения камеры? Какую дозу излучения получает камера за час?

33.20. Безводный окисел кальция CaO массой 250 мг, содержащий радиоактивный изотоп ^{45}Ca , исследуется с помощью счетчика. Счетчик регистрирует 12% частиц, вылетающих из образца. Скорость счета с поправкой на радиоактивный фон 66 имп/с. Найдите процентное содержание изотопа ^{45}Ca в окисле кальция.

33.21. При измерении активности препарата счетчиком Гейгера было зарегистрировано 10^3 имп/с. При измерении фона счетчик зарегистрировал 600 имп/с. Разрешающее время счетчика $2 \cdot 10^{-4}$ с. Сколько частиц исследуемого препарата проходит каждую секунду через счетчик? (Разрешающим временем счетчика называется время, необходимое для его возвращения в исходное состояние после срабатывания.)

33.22. Найдите полную и кинетическую энергии протона, если при фотографировании его следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле с индукцией 1 Тл, длина стрелы сегмента оказалась равной 2,5 мм при хорде 20,00 см.

33.23. При движении протона в камере Вильсона, заполненной парами воды, радиус кривизны траектории протона изменился от 20 до 10 см. Сколько пар ионов образовал на своем пути протон, если на камеру было наложено однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл? Энергия, необходимая для ионизации паров воды, 33 эВ.

33.24. Генератор Ван-де-Граафа имеет заряженную сферу радиусом 0,5 м, центр которой удален от плоского проводящего основания на расстояние 5 м. Между сферой и основанием помещена газоразрядная трубка, в которой происходит ускорение протонов, обладающих ничтожно малой начальной кинетической энергией. Какова максимальная скорость протонов, если критическая напряженность поля у поверхности сферы 3 МВ/м?

33.25. В линейном ускорителе трубки присоединены к противоположным клеммам генератора попеременно так (рис. 33.1), что в каждый момент времени разность потенциалов в четных промежутках равна $U_0 \cos 2\pi \nu t$, в нечетных — $U_0 \sin 2\pi \nu t$. Предполагая, что ионы инжектируются в ускоритель с начальной энергией W_0 и что промежутки между трубками составляют $z = 25\%$ от длины трубок, вычислите необходимую длину трубок в линейном ускорителе. Рассчитайте длину пролетных трубок для ускорения протонов от энергии $W_0 = 4$ до $W = 40$ МэВ при частоте генератора $\nu = 100$ МГц, если известно, что в каждом промежутке протон получает энергию $\Delta W = 1$ МэВ.

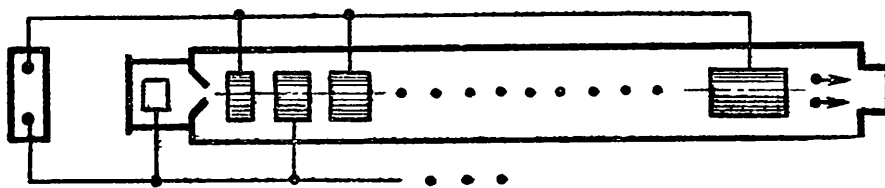


Рис. 33.1.

33.26. Индукция однородного магнитного поля в циклотроне 1 Тл, радиус дуантов 0,30 м. Пренебрегая релятивистскими эффектами, определите, до какой энергии можно ускорить в циклотроне α -частицы.

33.27. Определите время, в течение которого происходит ускорение α -частиц до энергии 2 МэВ в циклотроне. Индукция магнитного поля в нем 1,2 Тл, амплитуда напряжения на дуантах 20 кВ, временем движения частиц в зазоре между дуантами пренебречь.

33.28. Радиус дуантов циклотрона 0,5 м, эффективное ускоряющее напряжение между ними 25 кВ. частота генератора 10 МГц. Какой путь проходят протоны за время разгона?

33.29. Индукция магнитного поля в дуантах циклотрона, ускоряющего протоны до энергии 150 МэВ, равна 1,00 Тл. Чему равен радиус магнита? На какой частоте работают ускоряющие электроды? Каково должно быть относительное изменение электрического поля в процессе ускорения протонов, чтобы компенсировать расстройку ускорителя, вызванную релятивистскими эффектами?

33.30. По какому закону нужно изменять с течением времени частоту электрического поля в фазотроне для устранения расстройки ускорителя, если начальная частота ν_0 и за один оборот энергия частицы возрастает на величину ΔW ? Индукция магнитного поля ускорителя равна B .

33.31. Радиус устойчивой электронной орбиты в бетатроне 25 см, среднее (по площади) значение индукции магнитного поля меняется с постоянной скоростью 200 Тл/с. а) С какой скоростью меняется индукция магнитного поля на орбите электронов? б) Какое расстояние проходит электрон при разгоне до энергии 20 МэВ? в) Сколько оборотов сделает по равновесной орбите электрон за время разгона? Потерями энергии электрона на излучение пренебречь.

33.32. Увеличение скорости электрона в бетатроне происходит в течение четверти периода синусоидального напряжения городской сети (50 Гц). Радиус устойчивой орбиты электрона 0,835 м, максимальная индукция магнитного поля на орбите 0,4 Тл. Определите энергию, приобретаемую электроном по окончании первого оборота и в конце цикла ускорения. Потери на излучение не учитывать.

33.33. В синхрофазотроне одновременно изменяется частота $\omega(t)$ ускоряющего электрического поля и индукция $B(t)$ магнитного поля. а) По какому закону должна меняться циклическая частота электрического поля, чтобы ускорение протонов происходило на орбите постоянного радиуса r ? б) Какова должна быть индукция B и частота ω электрического поля в конце цикла ускорения, чтобы энергия ускоряемых протонов достигла $W = 2,2$ ГэВ при радиусе равновесной орбиты $r = 10,5$ м?

33.34. Природный литий состоит из смеси ${}^7\text{Li}$ (93%) и ${}^6\text{Li}$ (7%). Для получения очень чистого изотопа ${}^6\text{Li}$ используется масс-спектрометр, в котором фокусировка однозарядных ионов Li , прошедших ускоряющую разность потенциалов 20 кВ, осуществляется поперечным магнитным полем с индукцией 1,55 Тл. Поток частиц поворачи-

чивается при этом на 180° и направляется на коллектор. На каком расстоянии друг от друга фокусируются ионы изотопов лития? Сколько времени потребуется для осаждения на коллекторе легкого изотопа массой 10^{-6} кг при токе ионов ${}^6\text{Li}$, равном $0,1$ мкА?

33.35. При газодиффузионном способе разделения изотопов природного урана через пористые перегородки диффундируют молекулы гексафторида урана ${}^{235}\text{U}{}^6\text{F}$ и ${}^{238}\text{U}{}^6\text{F}$. Сколько ступеней обогащения должен пройти уран, содержащий $0,7\%$ делящегося изотопа ${}^{235}\text{U}$, чтобы его процентное содержание в смеси повысилось до 25% ? Скорость диффузии газа через перегородки обратно пропорциональна квадратному корню из молекулярной массы газа.

33.36. В исследовательском графитовом реакторе находится 50 т природного урана. Активная зона реактора представляет собой куб объемом 125 м³, средний поток тепловых нейтронов в реакторе $3 \cdot 10^{15}$ нейтронов/(м²·с). а) Полагая, что при делении ядра урана выделяется энергия 200 МэВ, вычислите мощность, выделяемую в реакторе. б) Какова активность реактора, если в среднем каждое деление оказывается эквивалентным 10 распадам ядер? в) Сколько ${}^{235}\text{U}$ «выгорает» в реакторе после 1 года непрерывной работы?

33.37. Сколько ${}^{239}\text{Pu}$ производит реактор мощностью 100 МВт в течение 1 месяца, если принять, что в среднем при одном акте деления ядра ${}^{235}\text{U}$ возникает $1,5$ ядра плутония?

33.38. Во сколько раз возрастает плотность нейтронов и мощность ядерного реактора за 1 мин, если коэффициент размножения нейтронов будет равен $1,005$ и среднее время жизни одного поколения нейтронов $0,1$ с?

ОТВЕТЫ

1.1. $v = \frac{t_0 - t}{t_0 + t} u.$

1.2. $\Delta t = \frac{l_0 (v_1 - v_2)^2}{2v_1 v_2 (v_1 + v_2)}$; $l_1 = v_2 \Delta t$ ($v_2 < 3v_1$); $l_1 = \frac{l_0 v_2}{v_1 + v_2}$ ($v_2 > 3v_1$).

1.3. 1ч.

1.4. $t = \frac{x}{v} + \frac{\sqrt{s^2 + x^2 - 2x\sqrt{s^2 - l^2}}}{u}$; $x = \sqrt{s^2 - l^2} + \sqrt{\frac{v^2}{v^2 - u^2} s^2 - l^2}.$

1.5. а) $\rho = \frac{a}{\sqrt{3}} \exp(\varphi - \varphi_0) \sqrt{3}$ ($\varphi_0 = \frac{\pi}{2}, \frac{7}{6}\pi, \frac{11}{6}\pi$); б) $l = \frac{2a}{3v}$; $s = \frac{2a}{3}.$

1.6. $\frac{n_1}{n_2} = \frac{v + u}{\sqrt{v^2 + u^2 - v}}$.

1.7. а) $v = \sqrt{u^2 + v^2 - \sqrt{2} uv}$; б) $s = \sqrt{s_0^2 - 2s_0 v_0 t \cos \varphi + v_0 t^2}$; в) $t_1 = \frac{s_0 \cos \varphi}{v}$;
г) $l = ut_1$; д) $t = t_1.$

1.8. а) $v = 6(t - t^2)$; $a = 6(1 - 2t)$; б) $t = 1$ с; в) $v_{\max} = 1,5$ м/с; г) $v_{\text{ср}} = 1$ м/с;
д) $t = \frac{3}{4}$ с; $v_{\text{ср. макс}} = \frac{9}{8}$ м/с.

1.10. $v_{\max} = \frac{\pi a_1 t_1}{2}$; $v_{\min} = \frac{\pi}{4} a_1 (3t_1 - 2t_2)$; $v_{\text{ср}} = \frac{\pi a_1 (6t_1 t_2 - 3t_1^2 - t_2^2)}{8t_2}.$

1.11. 1,73 с.

1.12. $\approx 30,6$ м.

1.13. $v_0 = \sqrt{2gH}$; $t = (2 + \sqrt{2}) \sqrt{H/g}$; $v_{\text{пад}} = 2\sqrt{gH}.$

1.14. $\Delta t = \frac{(1 + \sqrt{3}) v_0}{2g}$; $h = \frac{v_0^2}{8g}.$

1.15. $s = k \left[(2n - k - 2) \frac{g\tau^2}{2} + v\tau \right]$; $u = k [(2n - k - 2) g\tau + v].$

1.16. 4 м/с; 3,25 м.

1.17. а) 7,1 м/с; б) $y = \frac{3}{32} x^2$, $\varphi = \arctg \frac{2}{3}$; в) $a_n \approx 9,4$ м/с²; $a_\tau \approx 2,7$ м/с²;
г) 5,3 м.

1.18. а) $h = 30,6$ м; $R_1 = 12,5$ м; $R_2 = 0,41$ м; б) $a_{n \max} = g$; $a_{n \min} \approx 0,8$ м/с²;
 $a_{\tau \max} \approx g$; $a_{\tau \min} = 0.$

1.19. $\tg \alpha = \frac{2a_\tau}{\sqrt{g^2 - a_\tau^2}}.$

$$1.20. v_{\text{МИН}} = \sqrt{\frac{g}{2} (\sqrt{h^2 + 4l^2} + h)}.$$

$$1.21. x = \frac{v_0^2}{g} \left(\sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{gh}{v_0^2}\right)^2} - \frac{1}{2} + \frac{gh}{v_0^2} \right); \quad \cos \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{gh}{v_0^2}}; \quad s = \frac{v_0^2}{g} - 2h.$$

$$1.22. \text{ а) } s = \frac{(v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2gh}) v_0}{g}; \quad \text{ б) } \operatorname{tg} \varphi = \frac{v_0}{\sqrt{v_0^2 + 2gh}};$$

$$\text{ в) } \operatorname{tg} \alpha = \left[\sqrt{\left(\frac{2v_0}{v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2gh}} \right)^2 - 1} \right]^{-1}.$$

$$1.23. \text{ а) } x_1 = \frac{4v^2}{g} \sin \alpha; \quad \text{ б) } x_2 = 4x_1; \quad \text{ в) } x_3 = \frac{2v^2}{g \cos^2 \alpha} (\sin 2\alpha \pm \cos 2\alpha) (\cos \alpha \pm \sin \alpha).$$

$$1.24. v = \frac{(v_0 t - l_0) v_0}{\sqrt{(l_0 - v_0 t)^2 - h^2}}.$$

$$1.25. v = \frac{ux}{\sqrt{x^2 + l^2}}; \quad a = \frac{u^2 l^2}{(x^2 + l^2)^{3/2}}; \quad v_1 = 0,8 \text{ у.}$$

$$1.26. t = \tau [n^{1/3} - (n-1)^{1/3}].$$

$$1.27. x = s_0 \left(\frac{u_0}{v} + \frac{ks_0}{4v} \right).$$

$$1.28. \Delta t = \frac{T_1 T_2}{\pi (T_1 + T_2)} \left(\arccos \frac{R_3}{R_1} + \arccos \frac{R_3}{R_2} \right).$$

$$1.29. v = \frac{v_0 R}{R + v_0 t}; \quad s = R \ln \left(1 + \frac{v_0}{R} t \right).$$

$$1.30. a = \frac{5}{3} g.$$

$$1.31. a = 0,5k^2 \sqrt{1 + 4\alpha^2}.$$

$$1.32. \text{ а) } y = 0,5 \sqrt{0,01 - x^2}; \quad \text{ б) } v = 0,1 \sqrt{1 + 3 \cos^2 2t};$$

$$\text{ в) } a = 0,2 \sqrt{1 + 3 \sin^2 2t}; \quad \text{ г) } 0,2 \text{ м}; \quad 0,025 \text{ м.}$$

$$1.33. x = \sqrt{2rv_0 t}; \quad t = \frac{l^2}{2rv_0}.$$

$$1.34. \varphi = \operatorname{arctg} (\varepsilon t^2).$$

$$1.35. 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}^2.$$

$$1.36. \approx 6,4.$$

$$1.37. \omega = \frac{v_1 \sin \alpha \mp \sqrt{v_2^2 - v_1^2 \cos^2 \alpha}}{2l} \quad (\text{при } v_1 \sin \alpha > v^2).$$

$$1.38. 3 \text{ м/с}; \quad 6,05 \text{ м/с}^2.$$

$$1.39. \text{ а) } x = t^2 - \sin 2t^2; \quad y = 1 - \cos 2t^2; \quad \text{ б) } \sqrt{2\pi} \text{ м/с}; \quad \sqrt{\pi^2 + 4\pi + 8} \text{ м/с}^2; \quad \sqrt{8\pi} \text{ м/с},$$

$$\sqrt{2\pi^2 + 16} \text{ м/с}^2; \quad \text{ в) } 2 \text{ м}; \quad 4 \text{ м}; \quad \text{ г) } \text{Окружность радиусом } R \text{ с центром}$$

в точке соприкосновения колеса с дорогой.

$$1.40. \text{ а) } x_c = t + 0,5t^2; \quad v_c = 1 + t; \quad a_c = 1,0 \text{ м/с}^2; \quad \text{ б) } 5 \text{ м/с}; \quad 17,1 \text{ м/с}^2; \quad 15,1 \text{ м/с}^2;$$

$$\text{ в) } 5 \text{ м/с}^2; \quad 4,1 \text{ м/с}^2.$$

$$1.41. 1,95 \text{ 1/с.}$$

$$1.42. \omega = \frac{v_0 R^2}{r (R^2 - r^2)}; \quad \varepsilon = \frac{v_0 R^2}{r (R^2 - r^2)^{3/2}}.$$

$$2.1. 2,5v; \quad \cos (2\hat{v}, \hat{v}_x) = 0,8.$$

$$2.2. x = \frac{2mut - Ft^2}{2(mt + M)}; \quad s = \frac{(2Mu^2 + Fl)l}{2(M + m)u^2}.$$

$$2.3. \Delta m = \frac{2ma}{g+a}.$$

$$2.4. 1,04 \text{ кН}; 0,98 \text{ кН}; 0,92 \text{ кН}.$$

$$2.5. F_H = \frac{m}{M} F; t = \sqrt{\frac{2MH}{F}}; H_x = H.$$

$$2.6. v_{\text{макс}} \approx 2,67 \text{ м/с}; F_H = 10,8 \text{ Н}.$$

$$2.7. F = 470 \text{ Н}; F_{\text{д}} = 345 \text{ Н}.$$

$$2.8. \approx 1,22 \text{ с}; 1,44 \text{ кН}.$$

$$2.9. 18 \text{ м}.$$

$$2.10. \text{ а) } F_1 \approx 56,5 \text{ Н}; \text{ б) } F'_1 = 29,3 \text{ Н}; F'_2 = 29,2 \text{ Н}.$$

$$2.11. f = \frac{0,6m}{M+5,4m}.$$

$$2.12. l_{\text{мин}} = l_0; l_{\text{макс}} = l_0 + \frac{mg}{3k}.$$

$$2.13. \text{ В } 3,6 \text{ раза}.$$

$$2.14. F = 1,5 \frac{m}{l} g^2 t^2.$$

$$2.15. a_c = \frac{(M-m)(Mg-mg-F)}{(M+m)^2}; \Delta p = \frac{(M-m)(Mg-mg-F)t}{(M+m)}.$$

$$2.16. F_1 = \frac{M}{m+M} F; F_2 = \frac{m}{m+M} F.$$

$$2.17. F_H = m(g \sin \alpha + a \cos \alpha); F_{\text{д}} = m(g \cos \alpha - a \sin \alpha); a_1 = g \operatorname{ctg} \alpha; a_2 = g \operatorname{tg} \alpha.$$

$$2.18. v = \sqrt{\frac{gl(M \cos \alpha - m \sin \alpha)}{m+M}}; F_{\text{д}} = \frac{mMg(\sin \alpha + \cos \alpha)\sqrt{2}}{m+M}.$$

$$2.19. \text{ а) } f = \frac{\sin 2\alpha}{2(2+\cos^2 \alpha)}; \text{ б) } a_1 = g \sin \sqrt{1 + \frac{\sin^2 2\alpha}{4(2+\sin^2 \alpha)^2}};$$

$$a_2 = \frac{\sin 2\alpha}{2(2+\sin^2 \alpha)} g.$$

$$2.20. \operatorname{tg} \alpha = 0,5; \approx 1,8 \text{ с}.$$

$$2.21. \text{ а) } F = 20 \text{ Н}; \text{ б) } \alpha_0 \approx 8,5^\circ; F_{\text{мин}} \approx 18,7 \text{ Н}.$$

$$2.22. a = \frac{M \sin \alpha - fM \cos \alpha - 4m}{M+16m} g; F_{1\text{д}} = \frac{2mMg}{M+16m} (1+4 \sin \alpha - 4f \cos \alpha);$$

$$F_{2\text{д}} = 2F_{1\text{д}} \cos \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2}\right); F_{3\text{д}} = 2F_{1\text{д}}.$$

$$2.23. v = \sqrt{\frac{2R(\sqrt{2}-f)(1-f)g}{3+f}}.$$

$$2.24. \approx 0,8 \text{ м/с}; \approx 19,5 \text{ м/с}^2.$$

$$2.25. x_{\text{макс}} = \frac{v_0^2 \cos \alpha}{g}; y_{\text{макс}} = \frac{v_0^2}{g} [\sin \alpha - \ln(1+\sin \alpha)].$$

$$2.26. \text{ а) } v = \frac{40}{2+t} \text{ м/с}; s = 40 \ln \left(1 + \frac{t}{2}\right).$$

$$2.27. F = 12mg; a_1 = \frac{22}{17} g; a_2 \approx g.$$

$$2.28. \frac{2}{17} g; \frac{5}{17} g; \frac{7}{17} g.$$

2.29. а) $g/3 \leq a_1 \leq 3g$; $9,25 \text{ Н} \leq F_{\text{д}} \leq 27,8 \text{ Н}$; б) $\approx 1,20 \text{ с}$; в) $\approx 0,49 \text{ с}$.

$$2.30. a_0 = \frac{2(M-m)}{M+m} \sqrt{a^2 + ag + g^2}; F = \frac{4mM}{m+M} \sqrt{a^2 + ag + g^2}.$$

$$2.31. а) F_1 = \frac{18}{17} mg; F_2 = \frac{36}{17} mg; б) f = \frac{\sqrt{3}}{4}.$$

$$2.32. \approx 0,3g; \approx 0,49mg.$$

$$2.33. v \approx \sqrt{1,47gh}.$$

$$2.34. x = \frac{2kl}{3k - 2m\omega^2}.$$

$$2.35. 6 \text{ кН}.$$

$$2.36. \approx 10,7 \text{ м/с}.$$

$$2.37. \approx 0,83 \text{ с}^{-1}.$$

$$2.38. \approx 1750 \text{ об/мин}.$$

$$2.39. \approx 1,65 \text{ кг}.$$

$$2.40. f_{\text{мин}} = \frac{1 - 2\sqrt{3}v^2/gR}{1 + \sqrt{3}}; \varphi = \frac{\pi}{6} - \arctg f; f = \frac{\sqrt{3} + 2v^2/gR}{2\sqrt{3}v^2/gR - 1}.$$

$$2.41. \sqrt{\frac{(gR \operatorname{tg} \alpha - v^2) gR}{(gR + v^2 \operatorname{tg} \alpha)}} \leq u \leq \sqrt{\frac{(gR \operatorname{tg} \alpha + v^2) gR}{gR - v^2 \operatorname{tg} \alpha}}.$$

$$2.42. F_{\text{д}} = \frac{(gR \sin \alpha - v^2) m}{R \sin 2\alpha}; v = \sqrt{gR \sin \alpha}.$$

$$2.43. \omega = \frac{\sqrt{g^2 + (g - \omega_0^2 l)^2}}{l}.$$

$$2.44. f \geq \frac{(\omega^2 R + 2g) \sqrt{3}}{2g - 3\omega^2 R}.$$

$$2.45. \omega = \sqrt{\frac{(g+a)(1 \mp f \operatorname{tg} \alpha)}{r(\operatorname{tg} \alpha \pm f)}}.$$

$$2.46. а) \alpha = \arccos\left(\frac{3g}{5\omega^2 l}\right); б) \alpha = \arccos\left[\frac{3g}{(2n+1)\omega^2 l}\right].$$

$$2.47. \approx 39 \text{ м}; \approx 71 \text{ м}.$$

$$3.1. \vec{v}'_1 = \vec{v}'_2 = 2\vec{j} + 2\vec{k}.$$

$$3.2. 2m(v \cos \alpha \pm u); \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} \alpha + \frac{2u}{v \cos \alpha}.$$

$$3.3. 3 \sqrt{\frac{MH}{mg}}.$$

$$3.4. 10^3 \text{ м}.$$

$$3.5. x = \frac{v^2}{3fg}.$$

$$3.6. \vec{v}'_1 = \frac{(M_1 v_1 - m_2 v_2) \vec{i} + (m_1 u_1 + m_2 u_2) \vec{j}}{M_1 + m_2};$$

$$\vec{v}'_2 = \frac{-(M_2 v_2 - m_1 v_1) \vec{i} + (m_1 u_1 + m_2 u_2) \vec{j}}{M_2 + m_1}.$$

$$3.7. \operatorname{tg} \beta = 2 \operatorname{tg} \alpha.$$

$$3.8. v = \sqrt{\frac{gl}{2}}.$$

$$3.9. \approx 785 \text{ м}.$$

$$3.10. \text{ а, б) } x = \frac{Mv + m(v \mp u)}{(M + m)u} l; \text{ в) } s = l \sqrt{\left(\frac{m}{m+M}\right)^2 + \left(\frac{v}{u}\right)^2};$$

$$\text{ г) } u_x = \left(1 + \frac{M}{m}\right) v.$$

$$3.11. v + \frac{m}{M}(v - u \cos \alpha); \frac{u \sin \alpha}{g} \left[u \sin \alpha - 2v - 2 \frac{m}{M}(v - u \cos \alpha) \right];$$

$$v - \frac{mu \cos \alpha}{m+M}; \frac{u^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

$$3.12. v_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{gl}{\sin 2\alpha}}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{M}{m+M}.$$

$$3.13. \approx 0,86 \text{ м}; \approx 7,9 \text{ м/с}.$$

$$4.1. \Delta v = u \ln \frac{M_0}{M_0 - \mu t}.$$

$$4.2. \approx 31,5 \text{ т}.$$

$$4.3. \approx 8 \text{ км/с}.$$

$$4.4. 35,4 \text{ с}.$$

$$4.5. m = m_k (e^x - 1) \approx 12 \text{ т},$$

$$\text{ где } x = \frac{v}{u} + \frac{R_3 g}{u} \left[\frac{v}{2R_3 a + v^2} + \frac{1}{\sqrt{2aR_3}} \operatorname{tg} \frac{v}{\sqrt{2aR_3}} \right].$$

$$4.6. \Delta m = m_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{\pi v}{2u} \right) \right].$$

$$4.7. H = \frac{u}{2} \left(\frac{u}{g} - \frac{1}{\alpha} \right) \left(\ln \frac{m_0}{m_0 - m_1} \right)^2.$$

$$\text{ При } \alpha = \frac{2g}{u} \quad H = H_{\text{макс}} = \frac{u^2}{8g} \left(\ln \frac{m_0}{m_0 - m_1} \right)^2.$$

$$4.8. v_{\text{макс}} = u \left(\ln \frac{m_0 g}{\rho S u^2} + 1 \right) - \frac{m_0 g}{\rho S u}.$$

$$4.9. m = m_0 \exp \left[- \frac{g R_3 t}{u (R_3 + at)} \right].$$

$$4.10. 13,3 \text{ м/с}.$$

$$4.11. 1,03 \text{ м/с}.$$

$$4.12. \frac{mv(8v^2 - 2fgl)}{9l(2v^2 + 2fv\sqrt{2gh} + 3fgl)}.$$

$$5.1. A = mg \left(\sin \beta + \frac{f}{\sin \alpha} \cos \beta \right) l; \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha}{f}; \quad A_{\text{макс}} = \frac{mgl \sqrt{f^2 + \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha}.$$

$$5.2. 20 \text{ Дж}.$$

$$5.3. A = \frac{\rho g a h^2 b^2}{2(b^2 - a^2)}.$$

$$5.4. \Delta N = 51 \text{ кВт}.$$

$$5.5. N = \frac{mM(2g+a)}{m+M} \sqrt{\frac{2H[m(g+a) - Mg]}{m+M}}.$$

$$5.6. \alpha = \operatorname{arctg} f; \quad v = \frac{N}{mg \sqrt{1+f^2}}.$$

$$5.7. t = \frac{1}{fg} \ln \frac{N}{N - fmgv} \approx 0,5 \text{ с}.$$

$$5.8. 11,3 \text{ Дж}; 2,82 \text{ Дж}; 8,5 \text{ Дж}.$$

$$5.9. \vec{m\bar{v}} = \frac{1}{2} \vec{i} + \frac{17}{6} \vec{j} - \frac{e^3 - 4}{3} \vec{k}; \approx 19,25 \text{ Дж.}$$

$$5.10. \varphi = \arccos \frac{3}{4}; \quad \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

$$5.11. \approx 0,86 \sqrt{gl}; \quad \approx 0,64 \sqrt{gl}.$$

$$5.12. \text{ а) } A = 2fmg l; \quad \text{ б) } A_{\text{МНН}} = \frac{mg(h+fl)}{1+f^2}.$$

$$5.13. h = \frac{l\sqrt{2}}{4(1-f)}.$$

$$5.14. v_1 = v_0 \sqrt{\frac{\sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin(\alpha + \alpha_0)}}.$$

$$5.15. 2,4 \text{ м}; 7 \text{ м/с.}$$

$$5.16. 58 \text{ кН.}$$

$$5.17. \text{ а) } A = \frac{7}{12} mg l; \quad \text{ б) } v = \sqrt{2gl}.$$

$$5.18. s = \left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{l^2}{16fh}; \quad A = mgh + \left(1 + \frac{m}{M}\right) mg \frac{l^2}{16h}.$$

$$5.19. F = \frac{mMv^2}{4(m+M)r}.$$

$$5.20. t = \frac{1+n}{1-n} \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad s = \frac{2-n}{n} h.$$

$$5.21. F = \sqrt{6kmg l}.$$

$$5.22. a_1 = \frac{\sqrt{2kmg h}}{M}; \quad a_2 = \frac{\sqrt{km\left(2gh + \frac{M}{m+M}v_0^2\right)}}{M}.$$

$$5.23. \text{ а) } h = \frac{11mg}{k}; \quad \text{ б) } h = \frac{3mg}{k}.$$

$$5.24. v = \sqrt{\frac{17}{60}gl}; \quad v = \sqrt{\frac{gl}{3}}.$$

$$5.25. \text{ а) } u_1 = \frac{2m_2v_2 + v_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}; \quad u_2 = \frac{2m_1v_1 - v_2(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}; \quad \text{ б) при } m_1 = m_2$$

$$\text{ и } v_2 = 0 \quad \Delta W = \frac{m_1v_1^2}{2}; \quad \text{ в) } \frac{m_1m_2}{m_1m_2}(v_1 + v_2); \quad \frac{m_1m_2^2(v_1 + v_2)^2}{2(m_1 + m_2)^2}; \quad \frac{m_2m_1^2(v_1 + v_2)^2}{2(m_1 + m_2)^2};$$

$$\frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \frac{(v_1 + v_2)^2}{2}.$$

$$5.26. t = \frac{2l}{v_0}; \quad s = \frac{2Ml}{m+M}.$$

$$5.27. v = \frac{m \sin 2\alpha \sqrt{2gh}}{M + m \sin^2 \alpha}.$$

$$5.28. s = \frac{2(M+m)l}{M-m}; \quad v = \frac{[2m+M \pm \sqrt{m(M-m)}]v}{M}.$$

$$5.29. \text{ а) } \frac{4}{7} \sqrt{3gl}; \quad \frac{1}{7} \sqrt{gl}; \quad \text{ б) } \frac{1}{4} \sqrt{7gl}; \quad \frac{\sqrt{71-8\sqrt{21}}}{8} \sqrt{gl}.$$

$$5.30. \text{ а) } F_H = mg(3 \cos \varphi - 2 \cos \varphi_0); \quad a_n = 2g(\cos \varphi - \cos \varphi_0); \quad a_\tau = g \sin \varphi;$$

$$\text{ б) } \cos \varphi = \frac{1+2 \cos \varphi_0}{3}; \quad \text{ в) } \varphi = 0; \quad \cos \varphi_1 = \frac{\cos \varphi_0 \pm \sqrt{\cos^2 \varphi_0 + 3}}{3}.$$

5.31. а) $\approx 2,16 \text{ Н}$; $\approx 8 \text{ Н}$; $31,4 \text{ м/с}^2$; $\approx 70,5 \text{ м/с}^2$; б) $5,7 \text{ Н}$; $23,6 \text{ м/с}^2$.

5.32. а) $\frac{5}{2} mg$, $\frac{4}{3} mg$; б) $\frac{122}{49} mg$; $\frac{50}{49} mg$.

5.33. а) $N = \frac{3mg}{R} (2R - h)$; б) $a_{\text{макс}} = 5g$ ($h = 0$); $a_{\text{мин}} = g$ ($h = 2R$).

5.34. $s = \frac{2}{3} \sqrt{2Hr}$.

5.35. а) $v_0 = 2\sqrt{5gl}$; б) $v_0 = 2\sqrt{gl\left(5 + 8\frac{m}{M}\right)}$; $F_H = 2m\left(\frac{3M + 4m}{M + 2m}\right)g$.

5.36. $F_H = Mg + \frac{m}{8Ml} (mv_0^2 + 13,6Mgl)$.

5.37. а) $s_{\text{макс}} = \frac{m}{M} l \sin \varphi_0$; б) $v = \frac{m}{M} \sqrt{2gl (\cos \varphi - \cos \varphi_0) \cos \varphi}$;

$$F_H = \frac{(\cos^2 \varphi + 2 \cos \varphi - \cos \varphi_0) mg}{\cos \varphi}.$$

5.38. $\frac{40}{27} l$.

5.39. $\sqrt{\frac{3\sqrt{3} + 4}{2}} gR$.

6.1. $x \leq \frac{2(M + 2m) fl}{\sqrt{M^2 + [f(M + 2m)]^2}}$.

6.2. $F_H = mg \sqrt{1 - 8 \cos^2 \alpha}$; $\text{tg } \varphi = 3 \text{ ctg } \alpha$; $\frac{m_1}{m_2} = \text{tg}^2 \alpha$.

6.3. а) $F_1 = \frac{mg \sin \alpha}{\cos 2\alpha}$; б) $F_2 = \frac{mg \cos \alpha}{\cos 2\alpha}$; $x = \frac{a\sqrt{2}}{2} \cos 2\alpha \cos (45^\circ - 2\alpha)$.

6.4. $F = 0,5g \sqrt{(M - m)^2 + f^2 (M + m)^2}$; $f = \sqrt{\frac{M - m}{M}}$.

6.5. $\alpha = \text{arctg } f$; $F = mg \sqrt{1 + f^2}$.

6.6. $\frac{\pi}{6} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$.

6.7. $F_1 = mg \exp\left(-\frac{4}{3} \pi f\right)$; $F_2 = mg \exp\left(\frac{4}{3} \pi f\right)$.

6.8. $9,8 \text{ Н}$; $0,29$.

6.9. а) $F_1 = mg \left(\sin \alpha - \frac{\mu}{r} \cos \alpha\right)$; $F_2 = mg \left(\sin \alpha + \frac{\mu}{r} \cos \alpha\right)$; б) $\mu < rf$.

6.10. а) $f_{\text{макс}} = \frac{b}{2a}$; б) $F_{\text{мин}} = mgf \sqrt{1 + 4f^2}$.

6.11. $l \leq \frac{2a\sqrt{3}}{4} \sqrt{1 + \left(2f - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2}$.

6.12. $f_{\text{мин}} = \frac{m}{M} \text{ctg } \alpha$; $\vec{F}_A = \left[\frac{(m + M)g \sin 2\alpha}{4}\right] \vec{i} + \left[\frac{m + (m + M) \sin^2 \alpha}{2} g\right] \vec{j}$.

6.13. $\text{tg } \alpha = \frac{1 + f}{1 - f}$.

6.14. $\frac{a(f - 1)}{2f} \leq x$.

$$6.15. M = 2m \left(\frac{D}{d} - 1 \right); F = \frac{2mg(D-d)}{d + 2\sqrt{2Dd - D^2}}.$$

$$6.16. f_{\text{МНН}} \approx 0,03; f \approx 0,27.$$

$$6.17. \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{ctg} \alpha - \frac{b^2}{2(2b+a) \sin \alpha}.$$

$$6.18. \operatorname{tg} \alpha = \frac{L(M-m)}{l(4M+3m)}.$$

$$6.19. \text{a) } x_c = \frac{2R^2}{l} \sin \frac{l}{2R}; x_c = \frac{2\sqrt{2}R}{\pi}; x_c = \frac{2R}{\pi}; \text{б) } x = \frac{4R}{3\alpha} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

$$6.20. \text{a) } x_c = \frac{3}{16} nR \sin \frac{\pi}{n}; \text{б) } x_1 = \frac{3\sqrt{2}}{8} R; x_2 = \frac{3}{8} R.$$

$$6.21. h = \sqrt{\frac{5}{8}} R.$$

$$6.22. F_H = \frac{3mg}{32}.$$

$$7.1. \text{a) } \varphi = \frac{gt^2}{3r}; \text{б) } F = \frac{4}{3} mg.$$

$$7.2. \text{a) } \approx 1,74 \text{ с}; \text{б) } \approx 5,7 \text{ Н}; \text{в) } \approx 0,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

$$7.3. \text{a) } F_H = \frac{m_2(m_1gR^2 + M_{\text{ТДР}})}{m_2r^2 + m_1R^2}; F_A = m_1g + F_H;$$

$$\text{б) } L = \frac{(m_1R^2 + m_2r^2)}{r} \sqrt{\frac{2H(m_2g - F_H)}{m_2}}.$$

$$7.4. 10^5 \text{ Н}.$$

$$7.5. \approx 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}; \approx 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2.$$

$$7.6. \text{a) } n = \frac{mR^2\omega_0^2}{8\pi r f F}; \text{б) } n = \frac{R\omega_0}{3\pi} \sqrt{\frac{m\omega_0}{fkr}}; \text{в) } n = \frac{mR^2\omega_0}{4\pi f r k}.$$

$$7.7. M = \frac{2ab\rho\omega}{\pi^3} (\omega b t + \pi r_0)^3; v = \omega \sqrt{2\left(\frac{b}{\pi}\right)^2 + r_0^2 + \frac{2br_0}{\pi}}.$$

$$7.8. \frac{3\pi R n^2}{4fg}.$$

$$7.9. t = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{gR}}{u}\right) \right] \frac{I_0}{\mu R^2}.$$

$$7.10. \text{a) } \frac{mg}{4}; \text{б) } (1 - 0,75 \cos^2 \alpha) mg.$$

$$7.11. a_A = \frac{\sqrt{[F_1 + F_2(\sqrt{2}-1)]^2 m^2 R^2 + (F_2 t \sqrt{2})^4}}{m^2 R}.$$

$$7.12. \frac{2M(6m+M)g}{3(2m+M)}.$$

$$7.13. \text{a) } t = \frac{v_0 - \omega_0 r}{3fg}; v_c = \frac{2v_0 + \omega_0 r}{3}; \text{б) } t = \frac{\omega_0 r - v_0}{3fg}; v_c = \frac{2v_0 + \omega_0 r}{3}.$$

$$7.14. \text{a) } v = \frac{5}{7} \omega_0 r \sin \varphi; \text{б) } s = \frac{12(\omega_0 r \sin \varphi)^2}{49 fg};$$

$$\text{в) } s = \frac{2(\omega_0 r \sin \varphi)^2 (6f^2 + 7f \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha)}{g(\sin \alpha + f \cos \alpha)(7f + 2 \operatorname{tg} \alpha)^2}.$$

$$7.15. v_1 = \frac{2}{7} v; v_2 = \frac{5}{2} v.$$

$$7.16. \text{ а) } f_{\text{мин}} = \frac{\mu}{3r}; \quad \text{ б) } v = \frac{3r - \mu}{9r} gt.$$

$$7.17. \text{ а) } \alpha < \arccos \frac{r}{R}; \quad \alpha > \arccos \frac{r}{R}; \quad \text{ б) } f = \frac{(mrR + I \cos \alpha) F}{(mg - F \sin \alpha) (I + mR^2)};$$

$$\text{ в) } \alpha_0 = \arctg f; \quad F_0 = fmg \left(\frac{f^2}{\sqrt{1+f^2}} + \frac{r}{R} \right)^{-1}.$$

$$7.18. \text{ а) } v_0 = \sqrt{\frac{2gl(M+m)r^2}{MR^2 + (3M+m)r^2}}; \quad v_B = v_0 \sqrt{1 + \left(\frac{R}{r}\right)^2}; \quad v_C = v_0 \left(1 + \frac{R}{r}\right);$$

$$\text{ б) } T = \sqrt{\frac{2l[MR^2 + (3M+m)r^2]}{(M+m)gr^2}}.$$

$$7.19. m = M; \quad a_1 = \frac{g}{4}; \quad F_1 = \frac{11}{4} Mg; \quad a_2 = \frac{g}{4}; \quad F_2 = \frac{3}{2} Mg \quad \left(a_1 = \frac{g}{3}; \right.$$

$$\left. F_1 = \frac{4}{3} Mg; \quad a_2 = g/3; \quad F_2 = \frac{2}{3} Mg \right).$$

$$7.20. a_1 = \frac{3m+4M}{9m+8M} g; \quad a_2 = \frac{7m+8M}{9m+8M} g; \quad F_1 = \frac{6m(m+M)g}{9m+8M}; \quad F_2 = \frac{2mMg}{9m+8M}.$$

$$7.21. F_H = \frac{4}{19} mg (1 + 18 \cos \alpha) \sin \alpha; \quad a_1 = \frac{4}{19} \sin \alpha (1 - \cos) g; \quad a_2 = 3a_1.$$

$$7.22. F_H = \frac{m\omega^2 R}{\pi}.$$

$$7.23. \text{ а) } \Delta L_1 = \frac{mv_0^3 \sin \alpha \sin 2\alpha}{4g}; \quad \text{ б) } \Delta L_2 = \frac{mv_0^3 \sin \alpha \sin 2\alpha}{g};$$

$$\text{ в) } \Delta L_3 = \frac{mv_0 \cos \alpha}{g} \left(v_0 \sin \alpha \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2gH} + v_0^2 \sin^2 \alpha + gH \right).$$

$$7.24. \text{ а) } L_A = L_B = L_C = 4m\omega l; \quad \text{ б) } v_0 = 0; \quad \omega = \frac{2v}{l}; \quad \text{ в) } v_0 = 0,6 v; \quad \omega = 1,6 \frac{v}{l}.$$

$$7.25. x_c = \frac{Ml}{2M+m}; \quad y_c = \frac{mv_0}{2M+m} t - \frac{gt^2}{2}. \quad \text{ а) Будет составлять с горизон-}$$

$$\text{ том угол } \varphi = \frac{m^2 v_0^2}{(m+M)(2M+m)gl}; \quad \text{ б) } F_H = \frac{Mm^2 v_0^2}{(M+m)(2M+m)l}.$$

$$7.26. 3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; 39,5 \text{ Дж}.$$

$$7.27. F_H = Mg + \frac{9m^2 v_0^2}{8Ml}; \quad x = \frac{2}{3} l.$$

$$7.28. v = \frac{M}{3m} \sqrt{2gl}.$$

$$7.29. 0,2\%.$$

$$7.30. \text{ а) } \varphi = 2\pi \frac{mM}{3m^2 + 4mM + M^2}, \quad x = \frac{MR}{M+m} \sin \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{3m^2 + M^2 + 2mM}{3m^2 + M^2 + 4mM} \right) \right].$$

$$7.31. 154 \text{ кДж}.$$

$$7.32. \text{ а) } A_T = \frac{\pi f m g l}{6} \left(0,41 + \ln \operatorname{tg} \frac{3\pi}{8} \right); \quad \text{ б) } 0,5A_1.$$

$$7.33. 2,68 \text{ кВт}.$$

$$7.34. 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}; 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

$$7.35. \frac{mv_0^2}{4}.$$

$$7.36. M_{\text{тр}} = \frac{l-h}{l+h} mgr; \quad I = \left[\frac{hlt^2g}{(l+h)^3} - 1 \right] mr^2.$$

$$7.37. \text{ a) } v_1 = \sqrt{\frac{gl}{3}}; \quad \text{б) } v_2 = \sqrt{\frac{2g}{3l} [l^2 - x^2 + 4r^2 - (l - x - \pi r)^2]}.$$

$$7.38. s = R \arccos \left[\frac{10(R+r) + 7v^2/g}{17(R+r)} \right].$$

$$7.39. F_{\text{д}} = mg(2 \cos \varphi - \cos \varphi_0).$$

$$7.40. \text{ a) } v_c = \frac{\sqrt{3gl}}{2}; \quad \text{б) } F = \frac{mg \cos \varphi}{2l^2} (5l^2 - 2lx - 3x^2), \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$7.41. \text{ a) } L = ml \sqrt{\frac{gl}{3}}; \quad \text{б) } 4 \left(\frac{x}{l} - \frac{\cos \alpha}{2} \right)^2 + \left(\frac{y}{l} \right)^2 = 1.$$

$$7.42. \text{ a) } A = \frac{1 + 2 \cos \alpha - 3 \cos^2 \alpha}{4 \cos \alpha} mgl; \quad \text{б) } F_{\text{H}} = m \sqrt{g^2 + \left(\frac{\omega^2 l \sin \alpha}{2} \right)^2}.$$

$$7.43. s = \frac{v^2 r (M + 4m + 4m\rho^2/r^2)}{2\mu g (M + 4m)}.$$

$$7.44. \text{ a) } v = \sqrt{\frac{4gh(r - \mu \operatorname{ctg} \alpha)}{3r}}; \quad \text{б) } s = h \frac{r}{\mu}.$$

$$7.45. v_1 = 2 \cos \alpha \sqrt{\frac{gh}{27 - 6 \cos^2 \alpha}}; \quad a = \frac{g \sin 2\alpha}{9 - 2 \cos^2 \alpha}.$$

$$7.46. \text{ a) } \Delta W = \frac{\pi^2 m R^2}{3} (n_1^2 + 2n_2^2 \pm n_1 n_2); \quad \text{б) } t = \frac{\pi (n_1 \pm n_2) R}{fg};$$

$$\Delta W = m (\pi R n_2)^2; \quad t = \frac{3\pi R n_2}{2gf}.$$

$$7.47. \omega = \sqrt{\frac{2ngh}{M(m+M)(h^2 + 4\pi^2 R^2)}}; \quad \varepsilon = \frac{2\pi m^2 gh}{M(m+M)(h^2 + 4\pi^2 R^2)}.$$

$$7.48. v = \frac{M}{m} \sqrt{7,5gR}.$$

$$7.49. \text{ a) } W_{\text{к}} = \frac{5}{14} \frac{m^2 v^2}{M}; \quad \text{б) } W_{\text{к}} = \frac{5m^2 v^2}{14M} + \frac{35}{32} \frac{m^2 r^4 \omega^2}{MR^2}.$$

$$7.50. v = \frac{m}{M} \sqrt{\frac{20}{7} Rg}.$$

$$7.51. \frac{3mMgl}{2(3m+M)}.$$

$$7.52. \text{ a) } v_c = 0,5v_0; \quad \text{б) } v_A = \frac{(10 + 9\sqrt{2})v_0}{20}; \quad \text{в) } \Delta W_{\text{к}} = \frac{7mv_0^3}{40}.$$

$$8.1. g_{\text{C}} \approx 7 \cdot 10^4 g_3; \quad \rho_{\text{C}} \approx 1,75 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^3.$$

$$8.2. F = mg_0 \frac{x}{R_3} \quad (0 \leq x \leq R_3); \quad \Pi = \frac{mg_0}{2R_3} (3R_3^2 - 2R_3 x + x^2).$$

$$8.3. p_x = \frac{2}{3} \pi \gamma \rho^2 (R_3^2 - x^2); \quad p = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}.$$

$$8.4. g = \frac{2}{3} \pi \gamma \rho R; \quad \varphi = -\frac{35}{24} \pi \gamma \rho R^2.$$

$$8.5. \text{ a) } F_1 = \gamma \left(\frac{4\pi r^3}{3R} \right)^2 \rho_1 \cdot (\rho_2 - \rho_0); \quad \text{б) } F_2 = \gamma \left(\frac{4\pi r^3}{3R} \right)^2 \cdot \rho_1 (\rho_0 - \rho_2).$$

$$8.6. F = \frac{2\gamma m^2}{l^2} \ln \frac{2(1+\sqrt{5})}{1+\sqrt{17}}.$$

$$8.7. \frac{W_\Gamma}{W_C} \approx 2 \cdot 10^{10}.$$

$$8.8. 4,25 \cdot 10^4 \text{ км}; 2,6 \text{ км/с}.$$

$$8.9. \frac{m_C}{m_3} \approx 94.$$

$$8.10. \approx 3 \cdot 10^8 \text{ км}.$$

$$8.11. \text{ а) } E = -\gamma \frac{mM_3}{(h+H)}; \quad \text{ б) } \sigma = \sqrt{2\gamma M_3 \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{h+H} \right]};$$

$$\text{ в) } T = \frac{2\pi}{\sqrt{\gamma M_3}} \left(\frac{h+H}{2} \right)^{3/2}; \quad M_3 \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

$$8.12. T \approx 1,55 \text{ ч}.$$

$$8.13. \sqrt{2 - (T_1/T_2)^{2/3}}; \quad R_{\text{макс}} = [2(T_2/T_1)^{2/3} - 1]R.$$

$$8.14. 42 \text{ м/с}.$$

$$8.15. 250 \text{ лет}; \approx 3650 \text{ км/с}.$$

$$8.16. \approx 4 \cdot 10^4 \text{ Мт}.$$

$$8.17. \text{ а) } H = R_3; \quad \text{ б) } t = (\pi - 2) \sqrt{\frac{R_3}{g_0}} \approx 18,6 \text{ мин}; \quad \text{ в) } s = 0,87R_3.$$

$$8.18. W = \gamma m \left\{ \sqrt{M_3} \left[\frac{(r-R_3)\sqrt{M_3} - R_3\sqrt{M_\text{Л}}}{R_3 r} \right] - \frac{\sqrt{M_3 M_\text{Л}}}{r} \right\};$$

$$v = \sqrt{2\gamma \left(\frac{M_\text{Л} - M_3}{r} + \frac{M_\text{Л}}{R_\text{Л}} \right)}.$$

$$8.19. v = \sqrt{\frac{2\gamma M_C R_3}{R_M (R_3 + R_M)}}.$$

$$9.1. 15 \text{ км}.$$

$$9.2. \Delta l_1 = 1,5\Delta l_0; \quad W_{\text{п1}} = 1,25mg \Delta l_0; \quad \Delta l_2 = 2\Delta l_0; \quad W_{\text{п2}} = 1,6W_{\text{п1}}.$$

$$9.3. \sigma = \frac{\rho\omega^2}{2} (l^2 - x^2); \quad \omega = \frac{(\rho\omega^2 l^2)^2}{2E}.$$

$$9.4. 150 \text{ об/с}; 10 \text{ кДж}.$$

$$9.5. \approx 1,03 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$9.6. \text{ а) } P = \sigma S \sin \alpha; \quad \text{ б) } \vec{\Delta r} = \frac{\sigma}{E} \sqrt{a^2 + b^2} [\cos \alpha (1 - \cos \alpha) \vec{i} + \sin \alpha \vec{j}].$$

$$9.7. \Delta l = \frac{mgl}{2ES} (1 - \sin \alpha).$$

$$9.8. \Delta h = \frac{\rho g H^2}{6E}.$$

$$9.9. \text{ а) } \Delta S = \frac{mg}{E} (1 - \mu); \quad \Delta V = \frac{mgl}{E} (1 - 2\mu); \quad \frac{\Delta S}{S} = \frac{mg(1 - \mu)}{\pi l E d};$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{4mg(1 - 2\mu)}{\pi E d^2}; \quad \text{ б) } Q = \frac{2l(mg)^2}{\pi E d^2}.$$

$$9.10. W = \frac{\pi(\rho g R)^2 H^3}{90E}.$$

9.11. $\approx 2,5 \text{ МДж.}$

9.12. $\Delta l = l \sqrt{\frac{2mg}{ES}}$; $\sigma = \sqrt{\frac{2Emg}{S}}$ при $\Delta l \ll l$.

9.13. $v = \sqrt{2,32gl_0}$.

9.14. $E = \frac{mgl^3}{8I\delta}$.

9.15. $y = y_1 + y_2 = \frac{mgl^3}{48EI} + \frac{5\rho gl^4}{96ES}$.

9.16. 0,26 рад; 6,5 кДж.

9.17. $k = \frac{M}{\alpha R^2}$.

10.1. а) $T = 2 \text{ с}$; $\varphi_0 = 0,5\pi$; $v_{\max} = 2\pi \text{ см/с}$; $a_{\max} = 2\pi^2 \text{ см/с}^2$; б) $t = (k - 0,5) \text{ с}$,
 $\bar{k} = 1, 2, 3, \dots$; $v = \pi \sqrt{4 - x^2}$; $a = -\pi^2 x$.

10.2. а) $A = 4,15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $T = 1,4 \text{ с}$; б) $\varphi = \frac{\pi}{12}$; в) $v_{\max} = 0,485 \text{ м/с}$;
 $a_{\max} = 0,83 \text{ м/с}^2$; г) $t_1 = 0,234 \text{ с}$; $t_2 = 0,468 \text{ с}$.

10.3. $F = 1,20 \cos 20\pi t \text{ Н}$; а) $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$; б) 0,8 Н; 0,8.

10.4. $\approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$; $1,56 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$.

10.5. $\approx 12,7 \text{ кН}$.

10.6. 0,3; $0 < A \leq 0,075 \text{ м}$.

10.7. а) $A_1 = \frac{1}{2\pi v} \sqrt{2gH - \left(\frac{g}{2\pi v}\right)^2}$; б) $A_2 = \frac{g}{4\pi^2 v^2}$.

10.8. $\frac{T_x}{T_y} = \sqrt{\frac{l - l_0}{l}}$.

10.9. а) $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$; $A = \frac{mg}{k} \sqrt{1 + \frac{2kh}{mg}}$; б) $\frac{T}{T_0} = \left(1 - \frac{\arccos \frac{x}{A}}{\pi}\right)$;

в) $T = \pi \sqrt{\frac{m}{3k}}$.

10.10. $T = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{\gamma m}}$.

10.11. а) $l = \frac{36gt^2}{\pi^2}$; б) $v_{\max} = \frac{\pi A}{6t}$; $a_{\max} = \frac{\pi^2 A}{36t^2}$.

10.12. 70 с.

10.13. $\approx 1,94 \text{ Н}$.

10.14. а) $x_1 = \frac{2}{3} \frac{mg}{k} \cos \sqrt{\frac{3k}{2m}} t$; $x_2 = 0,5x_1$; б) $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$; $A = \frac{\sigma}{4} \sqrt{\frac{m}{k}}$.

10.15. а) $T_1 = T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{mM}{(m+M)(k_1+k_2)}}$; б) $x_1 = \frac{Mx_0}{m+M} \cos \frac{2\pi}{T} t$;
 $x_2 = \frac{mx_0}{m+M} \cos \frac{2\pi}{T} t$.

10.16. $T = 2\pi \sqrt{\frac{3l}{g}}$.

10.17. $n = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{g}{(2/3 + \pi) D}}$.

$$10.18. \frac{\omega_1}{\omega_2} = \sqrt{3}.$$

$$10.19. \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{4kl + mg}{4kl - mg}}.$$

$$10.20. \text{ а) } T = \pi \sqrt{\frac{23}{15} \frac{l}{g}}; \quad \text{ б) } x = 0,5l.$$

$$10.21. \omega = \sqrt{\frac{15}{2} \frac{(\rho_1 - \rho_2) g}{(13\rho_1 + 43\rho_2) R}}.$$

$$10.22. \text{ а) } T_1 = \pi \sqrt{\frac{ml^3}{12EJ}}; \quad \text{ б) } T_2 = \sqrt{\frac{ml^3}{2EJ}}.$$

$$10.23. \omega = 0,95 \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

$$10.24. n = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{5g}{7(R-r)}}.$$

$$10.25. T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}; \quad T = \frac{T_1 T_2}{\sqrt{T_1^2 + T_2^2}}.$$

$$10.26. T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{3g}}.$$

$$10.27. T = 2\pi \sqrt{\frac{J_1}{J_0 \omega \Omega}}.$$

$$10.28. \text{ а) } \delta = \frac{2\pi \ln k}{t_1} \sqrt{\frac{l}{g}}; \quad \text{ б) } t_2 = 2t_1; \quad \text{ в) } n = \frac{t_1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad \text{ г) } t_3 = 0,5t_1.$$

$$10.29. 1,25.$$

$$10.30. x = 0,1 \exp | -0,2t | \cos 8\pi t \text{ м.}$$

$$10.31. \varphi = \frac{\omega_0}{\omega} \exp(-\beta t) \sin \omega t, \text{ где } \omega = \frac{\sqrt{40mr^2 c_1 - 25c_2^2}}{4mr^2}, \quad \beta = \frac{5c_2}{4mr^2}.$$

$$10.32. \text{ а) } \eta = \frac{\rho d^2}{9} \sqrt{\omega_0^2 - \omega_1^2} = 1,04 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2; \quad \text{ б) } x = 0,05 \exp | -3t | \cos 4t \text{ (м).}$$

$$10.33. \text{ а) } T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}; \quad \text{ б) } A_i = \sqrt{\left(\frac{fg}{kM}\right)^2 - \frac{(mv)^2}{kM}} - i \frac{2Mgf}{k} (i = 1, 2, 3, \dots);$$

$$\text{ в) } s = \frac{1}{2fg} \left(\frac{mv}{M}\right)^2.$$

$$10.34. \text{ а) } v_1 = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{13}{2}}; \quad \text{ б) } v_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} v.$$

$$10.35. \text{ а) } \approx 3 \text{ л/с}; \quad \approx 3,1 \text{ л/с}; \quad \text{ б) } x = 2,32 \cdot 10^{-2} \cos(3t - 0,43\pi) \text{ м}; \quad v = 7,1 \times 10^{-2} \cos 3,1t \text{ м/с}; \quad \text{ в) } \approx 2,15.$$

$$10.36. F \approx 0,2 \cos 10\pi t \text{ Н}; \quad \text{ а) } \varphi \approx -\arctg 0,35; \quad \text{ б) } 0,2 \text{ с}; \quad \text{ в) } \approx 0,8 \text{ с.}$$

$$10.37. \text{ а) } A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \varphi}; \quad \text{ б) } \Delta \varphi = \arccos \frac{A_2}{2A_1}; \quad \text{ в) } T = (v_1 - v_2)^{-1}.$$

$$10.38. \text{ а) Уравнение траектории точки: } y^2 = 4,5 - 2,25x; \quad \text{ б) } 2,5\omega \text{ м/с}; \quad 2,14\omega^2 \text{ м/с}^2.$$

$$10.39. \text{ а) } p = -\frac{\rho A \omega^2}{k} \cos(\omega t - kx); \quad \text{ б) } I = 0,5\rho A^2 \frac{\omega^3}{k}.$$

$$10.40. \text{ а) } \xi = 5 \cdot 10^{-4} \cos(2760t - 1,92x) \text{ м}; \quad v = -1,38 \sin(2760t - 1,92x) \text{ м/с}; \\ p = 2,02 \cdot 10^6 \sin(2760t - 1,92x) \text{ Па}; \quad \text{ б) } 4,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \quad -0,69 \text{ м/с.}$$

- 10.41. а) $A = 2y_0 \sin\left(\omega \frac{x}{v}\right)$; б) $E = \pi \rho \omega v s y_0^2$.
- 10.42. а) $\xi = 10^{-3} \sin 110\pi \left(t \mp \frac{x}{330}\right)$ м; б) v_{\min} при $x = 1,5; 4,5; 7,5$ м; v_{\max} при $x = 0; 3; 6; 9$ м.
- 10.43. $v = (2n + 1) 3,8$ кГц, $n = 0, 1, 2, \dots$.
- 10.44. $\simeq 7 \cdot 10^{-3}$ Вт.
- 10.45. 122 Н; 570 м/с; 7,6 Н.
- 10.46. 10^{-2} м.
- 10.47. $4 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹.
- 10.48. 1,65 м; $5 \cdot 10^{-4}$ Па; $\simeq 110$ дБ.
- 10.49. $2,9 \cdot 10^{-9}$ Вт; $\simeq 18$ дБ; 15,8 м.
- 11.1. $F = fS (\rho_0 + \rho gh) - mg \sin \alpha$.
- 11.2. $x = \frac{S_1 + S_2}{S_2} h$.
- 11.3. а) $\frac{2m}{\rho S}$; б) $mg + \frac{\rho_0 S}{2}$.
- 11.4. $h = \frac{m}{\pi \rho R^2} + \frac{2}{3} R$.
- 11.5. $A = \frac{\rho g l^2 S^2}{2} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}\right)$; $T = 2\pi \sqrt{\frac{h S_1 S_2}{g S^2}}$.
- 11.6. а) $\simeq 1,2$ кг; б) $\simeq 0,7$ кг.
- 11.7. а) 19,6 кПа; б) 9,5 кН; в) 0,5г.
- 11.8. $\Delta h = \frac{\omega^2 l^2}{2g}$, $\rho_{\max} = \rho_0 + \rho gl + \rho \frac{\omega^2 l^2}{4}$.
- 11.9. $\omega = 8 \sqrt{\frac{g}{D}}$; $F = \frac{49}{4^{\frac{5}{2}}} \pi \rho \omega^2 D^4$.
- 11.10. $\simeq 1$ кг; $\simeq 39$ Н.
- 11.11. $\simeq 0,16$ м.
- 11.12. $m = \frac{P_1 \rho_2 - P_2 \rho_1}{(\rho_2 - \rho_1) g}$; $\rho = \frac{P_1 \rho_2 - P_2 \rho_1}{P_1 - P_2}$.
- 11.13. $V_{\pi} = \left(1 - \frac{n \rho_1 + \rho_2}{(n-1) \rho_0}\right) V$.
- 11.14. $F_1 = \frac{\pi g R^2}{24} (5\rho_{Fe} + 11\rho_{Pb} - 16\rho_0)$; $F_2 = \frac{\pi g R^3}{24} (5\rho_{Pb} + 11\rho_{Fe} - 16\rho_0)$.
- 11.15. $N_A = \frac{64mg - 5\rho g l s}{160}$; $M_{Bx} = \frac{2}{\sqrt{5}} N_A$; $N_{By} = \left(1 - \frac{2\sqrt{5}}{25}\right) mg - \frac{19\sqrt{5}}{160} \rho g l s$.
- 11.16. а) $h \leq l (1 - \sqrt{1 - \rho_1/\rho_0})$; б) $h = l (1 - \sqrt{1 - \rho_1/\rho_0})$.
- 11.17. $h \geq \sqrt{\frac{\rho_0^2 s}{6\rho (\rho_0 - \rho)}}$; $h \geq \sqrt{\frac{\rho_0^2 s}{2\pi\rho (\rho_0 - \rho)}}$.
- 11.18. 85,3 Н.
- 11.19. а) $A = \frac{(\rho_2 - \rho_0)^2 g l^2 s}{2(\rho_2 - \rho_1)}$; б) $h = \frac{(\rho_2 - \rho) l}{\sqrt{\rho_2 (\rho_2 - \rho_1)}}$;
в) $T = \pi \left(\sqrt{\frac{\rho_0 l}{\rho_2 g}} + \sqrt{\frac{\rho_0 l}{(\rho_2 - \rho_1) g}}\right)$.
- 11.20. $\simeq 320$ Н.

11.21. $\approx 5,6$ с.

11.22. $h = \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{s} \right)^2$.

11.23. $t = \frac{S_1}{2S_2} l \sqrt{\left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \frac{\rho S_1}{2F}}$

11.24. а) $\sqrt{\frac{l}{g} \left[\left(\frac{l^2}{S} \right)^2 - 1 \right]}$; б) $\sqrt{\frac{l}{g \pm a} \left[\left(\frac{l^2}{S} \right)^2 - 1 \right]}$;

в) $\sqrt{\frac{l\sqrt{2}}{2g} \left[\left(\frac{l^2\sqrt{2}}{S} \right)^2 - 1 \right]}$.

11.25. $t = \frac{\pi r^2 R}{2\rho S (r+R)} \cdot \sqrt{\frac{h}{g}}$.

11.26. $v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S}}$.

11.27. а) $v = \sqrt{2g(H_1 + \rho_2/\rho_1 \cdot H_2)}$; б) $x = \left(\sqrt{H_1 + \rho_2/\rho_1 H_2} - \frac{t}{n} \sqrt{g} \right)^2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} H_2$.

11.28. а) $v_1 = \sqrt{2gH}$; б) $v_2 = \sqrt{2gh + \omega^2 R^2}$.

11.29. а) $l_{\max} = H$ при $x = 0,5H$; б) $l(t) = H - \frac{S_2}{S_1} t \sqrt{gH}$.

11.30. $10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$.

11.31. а) $m = S_2 S_1 t \sqrt{\frac{2p\rho}{S_1^2 - S_2^2}}$; б) $N = S_2 S_1 \sqrt{\frac{2p^3}{\rho(S_1^2 - S_2^2)^3}}$.

11.32. $N_{\max} = \frac{8\sqrt{2}}{27} \rho S (gH)^{3/2}$.

11.33. а) $25,5 \text{ П}$; б) $v = v_0 \frac{y}{h} + \frac{\rho g \sin \alpha}{2\mu} (2hy - y^2)$.

11.34. $\eta = \frac{f\varphi(R^2 - r^2)}{4\pi l \omega R^2 r^2}$.

11.35. $t = \frac{9\pi}{\rho g} \eta \frac{d}{k} \left(\sqrt[3]{1 + \frac{6Kh}{\pi d^3}} - 1 \right) = 46 \text{ мин.}$

11.36. $\eta = \frac{\sqrt{(kT - 4\pi^2 m)m}}{ST}$.

11.37. $0,054 \text{ кг/с}$.

11.38. $0,31 < 0,5$.

11.39. $\Delta p = 8\eta\rho l S_1 \sqrt{gL} \left(\frac{\pi}{S_1} \right)^2 \approx 1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $F = \frac{\rho g L (S_2 - S_1)^2}{2S_2} = 1,35 \text{ кН}$.

12.1. $\Delta l = l \left[\frac{a}{2} (T - T_0)^2 + \frac{b}{3} (T - T_0)^3 \right]$.

12.2. $\approx 0,7 \text{ м}$.

12.3. $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\approx 282 \text{ К}$.

12.4. $\approx 190 \text{ мм}^3$.

12.5. 748 мм .

12.6. $\beta = \frac{\Delta H}{(T - T_0) H}$, где ΔH — разность уровней, H — высота столбов жидкости при одинаковой температуре.

12.7. $5 \cdot 10^7 \text{ Па} \leq \sigma \leq 10 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

$$12.8. \delta = 2\alpha l \Delta T - \frac{3\sigma l}{2E}.$$

$$12.9. \simeq 3,3 \text{ кН.}$$

$$12.10. \simeq 0,85\%.$$

$$12.11. \simeq 6,4 \cdot 10^{-2} \text{ Н.}$$

$$13.1. \text{ а) } \Delta l = \frac{l^2}{2(h_0 \pm l)}; \text{ б) } \Delta l = \frac{\sqrt{4h_0^2 + 4h_0l + 9l^2} - 2h_0 - l}{4}.$$

$$13.2. \Delta p = \frac{(p_1 \mp \rho g h_1) V_1}{\left(V \mp \frac{h_2 - h_1}{2} S\right)}.$$

$$13.3. \simeq 0,27 \text{ кг.}$$

$$13.4. 0,1 \text{ кг.}$$

$$13.5. \simeq 4 \text{ кг.}$$

$$13.6. m = \frac{(\rho_0 - \rho_1) \rho_0 g S H^2}{2 [2\rho_0 + (\rho_0 - \rho_1) g H]}.$$

$$13.7. a = \frac{3F - \rho_0 S - \rho g l S}{F - \rho_0 S + \rho g l S} g.$$

$$13.8. A = \frac{1}{2k} \left(\frac{\rho_0 \Delta S \cdot \Delta T}{T_0} \right)^2.$$

$$13.9. \text{ а) Объемы изменятся в 2,2 и 0,4 раза; б) 700 К.}$$

$$13.10. p_1 = \frac{5p_0 - 2p}{3}; p_2 = p; p_3 = \frac{4p_0 - p}{3}; \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

$$13.11. \simeq 480 \text{ К; } \simeq 1150 \text{ К.}$$

$$13.12. 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль; } 6,34 \cdot 10^{-3} \text{ кг, } 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$13.13. 0,2 \text{ кмоль; } 2,4 \text{ кг.}$$

$$13.14. 482 \text{ Н.}$$

$$13.15. 0,61 \text{ кг.}$$

$$13.16. 1,4 \cdot 10^5 \text{ Па; } 0,26 \cdot 10^5 \text{ Па; } 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

$$13.17. \text{ а) } \frac{\rho_0 (S_1 - S_2) \Delta l}{R \Delta T}; \text{ б) } \frac{[\rho_0 (S_1 - S_2) - (M + m) g] \Delta l}{R \Delta T}.$$

$$13.18. 87,5 \text{ Па.}$$

$$13.19. 29 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

$$13.20. 2,72 \text{ м.}$$

$$13.21. 9,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

$$13.22. p = p_0 \exp\left(-\frac{N\tau}{V_0}\right); \simeq 28 \text{ мин.}$$

$$13.23. 1,74 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$13.24. \rho = \frac{\rho \sum m_i}{RT \sum m_i / \mu_i}; z = \frac{\rho N_A}{RT}.$$

$$13.25. 27 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}; 32,7 \text{ кПа; } 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$13.26. \simeq 28,4\%.$$

$$14.1. \text{ а) } p_1 = 2mz v^2 \sin^2 \alpha; \text{ б) } p_2 = 2mz (v + u)^2 \sin \alpha; \text{ в) } p_3 = 2mz (v \sin \alpha + u)^2.$$

$$14.2. p V^{\frac{5}{3}} = \text{const.}$$

$$14.3. t \simeq \frac{3}{2} \frac{M}{\bar{n} m \bar{v} l^2} \cdot \ln 2.$$

$$14.4. \simeq 10^7 \text{ К.}$$

$$14.5. 3,8 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3.$$

$$14.6. \quad T = \frac{(\rho_1 + 2\rho_2) T_1 T_2}{\rho_1 T_2 + 2\rho_2 T_1}.$$

$$14.7. \quad v = \sqrt{\frac{3\rho N_A}{2\mu}}.$$

$$14.8. \quad 1,45 \cdot 10^5 \text{ K}.$$

$$14.9. \quad \text{a) } 2,42 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}; \quad \text{б) } 2,9 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

$$14.10. \quad dN = \frac{2\rho V}{\pi} (kT)^{-\frac{5}{2}} \sqrt{\varepsilon} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) d\varepsilon.$$

$$14.11. \quad \text{a) } \simeq 5,4 \cdot 10^{16}; \quad 7,5 \cdot 10^{-8} \%; \quad \text{б) } \simeq 2,9 \cdot 10^{16}; \quad 4 \cdot 10^{-8} \%.$$

$$14.12. \quad 3 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$14.13. \quad 340 \text{ K}.$$

$$14.14. \quad \rho = \rho_0 (1 - \alpha h) \frac{\mu g}{\alpha R T_0}.$$

$$14.15. \quad \rho_0 = \frac{RT}{V} \sqrt{\frac{\Delta F}{\mu g N_A}}.$$

$$14.16. \quad \text{a) } H = \frac{RT}{\mu g} \ln \frac{\pi \rho_0 D^3}{6m + \pi \rho_1 D^3}; \quad \text{б) } \Delta V = \frac{\pi D^3}{6} \left[\exp\left(\frac{\mu g H}{RT}\right) - 1 \right].$$

$$14.17. \quad \text{a) } 9 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad \text{б) } n = n_0 \exp\left(\frac{4\pi^2 \mu f^2 x^2}{RT}\right); \quad \text{в) } \rho = \rho_0 \exp\left[\frac{\mu}{RT} (4\pi^2 f^2 x^2 - gy)\right].$$

$$14.18. \quad \simeq 0,7 \text{ Па}.$$

$$14.19. \quad \text{a) } \simeq 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}; \quad \simeq 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}; \quad \text{б) } \sim 10^{21} \text{ км}; \quad \sim 10^9 \text{ лет}.$$

$$14.20. \quad \sim 10^{41}.$$

$$14.21. \quad 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}; \quad 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

$$14.22. \quad \frac{l}{\lambda} = \pi \sqrt{2} \sigma \left(\frac{m}{\mu} \cdot \frac{N_A}{V} \right)^{2/3}.$$

$$14.23. \quad \text{a) } \rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{d^2}{4V} \sqrt{\frac{RT\pi}{2\mu}} t\right); \quad \text{б) } \rho = \rho_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{4V} \sqrt{\frac{RT\pi}{2\mu}} t\right) \right].$$

$$14.24. \quad 9,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}.$$

$$14.25. \quad 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$14.26. \quad \frac{dm}{dt} = \frac{d^2}{4} \left(\rho_1 \sqrt{\frac{\pi \mu_1}{2RT_1}} - \rho_2 \sqrt{\frac{\pi \mu_2}{2RT_2}} \right); \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}};$$

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\max} = \frac{\rho_1 d^2}{4} \sqrt{\frac{\pi \mu_1}{2RT_1}}.$$

$$14.27. \quad m = \frac{5\rho S}{12T_2 r} (\sqrt{T_2} - \sqrt{T_1}) \sqrt{\frac{3T_1 T_2 R}{\mu}} t \simeq 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

$$14.28. \quad 9 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ с}.$$

$$14.29. \quad \simeq 3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$14.30. \quad \simeq 335 \text{ м/с}.$$

$$14.31. \quad \simeq 3 \text{ мм}.$$

$$14.32. \quad \eta = \frac{\pi r^4 \rho_0}{8lV} \left(\ln \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_2 - \rho_0} \right)^{-1} t = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}); \quad D = 6 \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$14.33. \quad \simeq 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}).$$

$$14.34. \quad \frac{M}{l} = 2\pi\eta \frac{\omega r^2 R}{R - r}.$$

$$14.35. \quad \text{a) } \eta = \frac{2\delta ml}{\pi R^2 T_0}; \quad \text{б) } \varphi = \frac{\delta m \omega}{\alpha T_0}.$$

15.1. 273 К.

15.2. 1280 кДж.

15.3. 230 Дж/(кг · К).

15.4. $\Delta\lambda = (c_1 - c_2) \Delta T$.

15.5. $\Delta T = -0,9$ К; $\frac{\Delta m}{m} \simeq 0,67\%$.

15.6. 142 кДж.

15.7. 1,21 м/с.

15.8. 8,75 кг.

15.9. $\simeq 5,2 \cdot 10^3$ м/с.

15.10. $Q = \frac{17}{12} mv^2$.

15.11. $Q = \frac{mR^2\omega^2}{50}$.

15.12. $\Delta e = \alpha_1 m_2 g \sqrt[3]{\frac{m_1}{\rho_1}}$.

15.13. $c_V = \frac{i p_0}{2 \rho T_0}$; $c_p = \frac{i+2}{2} \frac{p_0}{\rho T_0}$.

15.14. $c = c_V + \frac{(\mu g H)^2}{12 R T^2}$.

15.15. 625 Дж.

15.16. 400 К; $1,33 \cdot 10^7$ Па.

15.17. 350 м/с; 380 м/с.

15.18. $\rho = \frac{mR}{2V} \left(T + \frac{q}{c_V} \right)$; $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{q}{c_V T} \right)$.

15.19. $A = \frac{SH}{4} (2p_0 + 4p_0 \ln 2 + \rho g H)$.

15.20. $\simeq 51$ кДж.

15.21. а) $A = \frac{m}{\mu} R T_1 \ln \frac{\mu p_1 V_2}{m R T_1}$; $Q = A$; б) $A = p_1 V_2 - \frac{m}{\mu} R T_1$; $Q = 3,5 A$.

15.22. $\Delta T = \frac{Q}{4R}$; $\Delta U = 0,75Q$; $A = 0,25Q$.

15.23. 1,67.

15.24. $p_3 = p_2$; $V_3 = \frac{A}{p_2} \left[\left(\ln \frac{p_1}{p_2} \right)^{-1} + \frac{2}{i+2} \right]$; $T_3 = \frac{\mu p_3 V_3}{mR}$.

15.25. $T = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$; $T = \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{p_2 - p_1}{p_1} \right) T_1$.

15.26. $1,15 \cdot 10^7$ Па; ≈ 330 К.

15.27. $V = \frac{2}{5} V_0 + \frac{3}{5} \frac{\nu R S T_0}{Mg}$; $T = \frac{3}{5} T_0 + \frac{2}{5} \cdot \frac{Mg V_0}{\gamma R S}$.

15.28. $\frac{V_2}{V_1} = 2,19$; $\frac{p_2}{p_1} = 0,348$; 6,5 кДж.

15.29. $T_3 = \frac{\mu}{mR} [A(\gamma-1) + pV]$; $p_3 = p \cdot \exp\left(-\frac{A}{pV}\right) \left[1 + \frac{(\gamma-1)A}{pV} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$;

$$V_3 = V \exp\left(\frac{A}{pV}\right) \left[1 + \frac{(\gamma-1)A}{pV} \right]^{\frac{1}{1-\gamma}}.$$

$$15.30. \frac{27}{17}.$$

$$15.31. \frac{dT}{dh} = \frac{(\gamma-1) \mu g}{\gamma R}; \text{ на } 10,0 \text{ К.}$$

$$15.32. v = \sqrt{\frac{2m^2RT}{\mu M (m+M) (\gamma-1)}} \approx 24,4 \text{ м/с.}$$

$$15.33. \Delta T = \frac{\mu g H}{iR}; \bar{u} = \frac{i}{2} \rho V \left(1 + \frac{\mu g H}{iRT}\right); x = \sqrt{1 + \frac{\Delta T}{T}}.$$

$$15.34. \approx 0,41 \text{ м}; \approx 11,3 \cdot 10^5 \text{ Па}; \approx 7,75 \text{ кг/м}^3.$$

$$15.35. \tau = 2\pi \sqrt{\frac{ml_0}{Sp_0 + mg}}; \tau = 2\pi \sqrt{\frac{ml_0}{\gamma (Sp_0 + mg)}}.$$

$$15.36. \tau = 2\pi \sqrt{\frac{mV}{2\gamma p S^2}}.$$

$$15.37. 0,49.$$

$$15.38. \text{ а) } k = \text{const}; \eta = \text{const}; D \sim p^1 \sim V; \text{ б) } k \sim \sqrt{T}; \eta \sim \sqrt{T};$$

$$D \sim T^{-2} \sim p^{-\frac{4}{7}} \sim V^{\frac{4}{5}}.$$

$$15.39. \approx 22.$$

$$15.40. n = \frac{(\gamma-1) c\mu - \gamma R}{(\gamma-1) c\mu - R}; Q = cmT \left(1 - 2^{\frac{1-n}{n}}\right); A = \frac{mRT}{(n-1)\mu} \left(2^{\frac{1-n}{n}} - 1\right);$$

$$\Delta U = \frac{mRT}{(\gamma-1)\mu} \left(1 - 2^{\frac{1-n}{n}}\right).$$

$$15.41. \text{ а) } c = c_V + R \cdot \frac{p_0 + aV}{p_0 + 2aV}; \text{ б) } c = c_V - R.$$

$$15.42. \text{ а) } p^{\gamma-1} \cdot V^{\gamma} \exp\left(\frac{a}{pV}\right) = \text{const}; VT^{\frac{1}{\gamma-1}} \exp\left(\frac{aR}{T}\right) = \text{const}; \text{ б) } p^{\frac{1}{\gamma-1}} V^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{apV}{R^2}\right) = \text{const}; VT^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{aT}{R}\right) = \text{const}; A = a \ln \frac{T_2}{T_1} -$$

$$-\frac{R \Delta T}{\gamma-1}; A = \frac{a}{2} \Delta T^2 - \frac{R \Delta T}{\gamma-1}.$$

$$15.43. \text{ а) } \Delta U = \frac{R^2 T_0}{(\gamma-1) p_0} \left(b - 3aR \frac{T_0}{p_0}\right); \text{ при } \frac{a}{b} = \frac{p_0}{3RT_0};$$

$$\text{ б) } A = R^2 \frac{T_0}{p_0} \left(b - \frac{3}{2} aR \frac{T_0}{p_0}\right); \text{ в) } C = \frac{R}{\gamma-1} + \frac{2aRT}{4aT - b^2 - b \sqrt{b^2 - 4aT}}.$$

$$15.44. A = \frac{mR}{2\mu} k (p_2^2 - p_1^2); Q = \frac{m(3-\gamma)}{2\mu(\gamma-1)} kR (p_2^2 - p_1^2).$$

$$15.45. \text{ а) } A = p_1 V_2 - p_1 V_1 \left(1 + \ln \frac{V_2}{V_1}\right); \text{ б) } A = R \left(T_1 \ln \frac{T_1}{T_2} + T_2 - T_1\right); \text{ в) } A =$$

$$= \frac{RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} - \ln \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1-\gamma}\right].$$

$$15.46. \text{ а) } 1120 \text{ кВт}; \text{ б) } 635 \text{ кВт.}$$

$$15.47. 0,207 \text{ кг.}$$

$$15.48. \text{ а) } \eta = \frac{2(p_1 V_1 - TR_4)}{(p_1 V_1 + RT_4)}; \text{ б) } \eta = \frac{2(1 - T_3/T_1)(V_2/V_1 - 1)}{7(V_2/V_1 - 1) + 5(1 - T_3/T_1)};$$

$$\text{ в) } \eta = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{0,286}; \text{ г) } A = \pi p_1 V_1; \eta = \frac{\pi}{\pi + 28}.$$

15.49. $\eta = 1 - \varepsilon^{1-\gamma}$.

15.50. 8,2 кг/ч.

15.51 200 К.

15.52. а) 180 Дж/К; б) 70 Дж/К.

15.53. 273 Дж/К.

15.54. $\simeq 54,5$ Дж/К.

15.55. а) 1,44 Дж/К; 2 Дж/К; б) $\simeq 3,2$ Дж/К; 0,92 Дж/К.

15.56. $\simeq 100$ Дж/К; $\simeq 3 \cdot 10^4$ Дж.

15.57. $\Delta s = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$.

15.58. $\Delta s = c_p \frac{m}{\mu} \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1T_2}$; б) $\Delta s = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{(V_1 + V_2)^2}{4V_1V_2}$.

15.59. $A_{\min} = RT_0 [\ln (p_2/p_1) + p_0 (p_2^{-1} - p_1^{-1})]$.

15.60. а) $T = \sqrt{T_1 \cdot T_2}$; б) $A = C \left(T_1^{\frac{1}{2}} - T_2^{\frac{1}{2}} \right)^2$.

15.61. 9,7 кВт · ч.

15.62. 0,1 моль; $\simeq 1,8$ кДж.

16.1. $4,0 \cdot 10^6$ Па.

16.2. $T_p = 291$ К; $T_{нд} = 300$ К.

16.3. $T = \frac{9V_{кр} \rho_{кр}}{R}$.

16.4. $\simeq 5,4 \cdot 10^{-9}$ м.

16.5. а) $A = \nu RT \ln \left(\frac{V_2 - \nu b}{V_1 - \nu b} \right) + \nu^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$; б) $\Delta U = \nu^2 a \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)$;
в) $Q = \nu RT \ln \left(\frac{V_2 - \nu b}{V_1 - \nu b} \right)$.

16.6 $\Delta T \simeq 1,7$ К.

16.7. а) $Q = \frac{aV_2}{V_1(V_1 + V_2)}$; б) $Q = \frac{i}{2} \left\{ \left[\left(p + \frac{a}{(V_1 + V_2)^2} (V_1 + V_2 - b) + \left(p + \frac{a}{V_1^2} \right) (V_1 - b) \right) \right] \right\} + \frac{aV_2}{V_1(V_1 + V_2)}$.

16.8. $s_p - s_u = 0,375$ Дж/К.

16.9. $\Delta c \simeq R \left(1 + \frac{2a}{RVT} \right)$; $T_x = T \frac{8a}{27Rb}$.

16.10. $\approx 2,35$ м.

16.11. $1,9 \cdot 10^5$ Па.

16.12. $4,5 \cdot 10^{-4}$ м³.

16.13. 1,9 кг.

16.14. $\simeq 1373$ К.

16.15. а) 63%; б) 100%.

16.16. 32%.

16.17. $\simeq 33\%$; $1,67 \cdot 10^5$ Па.

16.18. 820 Дж/(кг · К).

16.19. 0,9.

16.20. $2,25 \cdot 10^6$ Дж/кг.

16.21. $8 \cdot 10^{-2}$ кг.

16.22. $\simeq 1,47 \cdot 10^6$ Дж/кг.

16.23. а) $\simeq 195$ К; б) $3,1 \cdot 10^7$ Дж/кмоль; в) $2,5 \cdot 10^7$ Дж/кмоль.

16.24. $\simeq 290$ К.

$$16.25. \frac{\Delta m}{m} = 0,54\%.$$

16.26. $\simeq 550$ Па.

$$16.27. \frac{dT}{dh} = 3,5 \text{ К/км.}$$

16.28. $\simeq 2,5$ ч.

16.29. $7 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

$$16.30. h_{\min} = \frac{2\pi r^2 \sqrt{\rho g \sigma}}{k}.$$

$$16.31. \sigma = \frac{(2\pi R - l) ES}{lR}.$$

16.32. 404 К.

$$16.33. 6 \cdot 10^{-5} \text{ кг; } \frac{V_2}{V_1} = 1,1.$$

$$16.34. \frac{R_1^3 + R_2^3 - R_3^3}{R_3^3 - R_2^3 - R_1^3} \cdot \frac{\rho_0}{2}.$$

$$16.35. Q = mgH + 4\pi\sigma \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{2/3} \left(1 - n^{1/3} \right) - \frac{mg}{n^{4/3}} \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{1/3}.$$

$$16.36. W = 6(k-1)\sigma \frac{h}{d}; \Delta T = \frac{6(k-1)\sigma}{c\rho d}.$$

$$16.37. A = 2\pi\sigma d^2 + \frac{\pi d^3}{6} \rho_0 \left(1 + \frac{8\sigma}{\rho_0 d} \right) \ln \left(1 + \frac{8\sigma}{\rho_0 d} \right).$$

16.38. $\simeq 130^\circ$.

16.39. $1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $\simeq 1,6$ Н.

$$16.40. y_r = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g \varphi x}.$$

16.41. а) $\rho = \rho_0 - \rho g h \left(0 \leq h \leq \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \right)$; б) уменьшится в $\frac{g}{g+a}$ раз;

$$\text{в) } h_0 = \frac{2\sigma \cos \theta}{g(\rho - \rho_m)r}.$$

$$16.42. h_1 = \frac{r}{2 \operatorname{tg} \alpha} \left(\sqrt{1 + \frac{8\sigma \sin \alpha}{\rho g r^2}} - 1 \right); h_2 = \frac{R}{2 \operatorname{tg} \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8\sigma \sin \alpha}{\rho g R^2}} \right).$$

16.43. а) $\Delta h \approx 0,28$ м; б) $\frac{a \cdot \Delta h}{g+a}$; 0; в) $3,5 \cdot 10^{-2}$ м.

16.44. $1,46 \cdot 10^{-2}$ Н·м.

$$16.45. d = \frac{4\sigma(l-h)}{\rho_0 h + \rho g h(l-h)}.$$

16.46. $1,8 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с).

$$16.47. \Delta p = \pm \frac{2\sigma}{r} \cdot \frac{v_{\text{ж}}}{v_{\text{п}}}.$$

16.48. $2,4 \cdot 10^6$ Па.

16.49. $\simeq 15$ К.

16.50. $\simeq 0,18$ К.

17.1. $\simeq 8,6$ ч.

17.2. $\approx 800 \text{ K}$.

17.3. $0,11 \text{ м}$.

17.4. В $\frac{(\kappa_1 + \kappa_2)^2 b^2}{4\kappa_1\kappa_2 a^2}$ раз.

17.5. $T = \frac{\kappa_1 T_1 d_2 + \kappa_2 T_2 d_1}{\kappa_1 d_2 + \kappa_2 d_1}$.

17.6. $\kappa = \frac{m_1 m_2 l}{(m_1 + m_2) St} \ln \frac{T_1 - T_2}{\Delta T}$.

17.7. $m = \frac{\alpha St}{c} \left(\ln \frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3} \right)^{-1}$.

17.8. $\frac{dQ}{dt} = \frac{4\pi\kappa R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{|R_2 - R_1|}$; $T = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \frac{T_1 - T_2}{R} + \frac{R_1 T_1 - R_2 T_2}{R_1 - R_2}$.

17.9. а) $\approx 830 \text{ мДж}$; б) $T = T_1 - (T_2 - T_1) \left(\ln \frac{x}{R} \right) \left(\ln \frac{r}{R} \right)^{-1}$; в) $\frac{Q}{t} = 2\pi\kappa_0 l \times$
 $\times \left[(T_1 - T_2) + \frac{b}{2} [(T_1^2 - T_2^2)] \right] \left(\ln \frac{R}{r} \right)^{-1}$.

18.1. $Q_1 = -\frac{q}{2} \sum_{n=1}^{\frac{1}{2}(N-1)} \text{cosec} \frac{\pi n}{N}$, если N нечетное; $Q_2 = Q_1 - \frac{q}{4}$, если N четное. При $N=3$ $Q = -\frac{q}{\sqrt{3}}$, при $N=4$ $Q = -\frac{1+\sqrt{2}}{4} q$.

18.2. $\text{tg}^{3/2} \frac{\alpha}{2}$.

18.3. $\varepsilon = \frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_0} \frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2}$.

18.4. $F_{\text{н}} = \frac{qQ}{8\pi\varepsilon_0 R^2}$; $T = 2\pi \sqrt{\frac{8\pi\varepsilon_0 m R^3}{qQ}}$.

18.5. $F = \frac{3\rho^2}{4\pi\varepsilon_0 r^4}$; $M = 0$.

18.6. $Q = 9q$.

18.7. $\vec{E} = \frac{1}{29\sqrt{29}} (10\vec{i} + 9\vec{j} + 12\vec{k})$ ед. напряженности СГС; $|\vec{E}| \approx \frac{1}{9}$ ед.

напряженности СГСЭ. В точке с координатами $(6, 0, 0)$.

18.8. $E = \frac{(m+M)qQ}{4\pi\varepsilon_0 (mQ+Mq)l^2}$; $a = \frac{(Q-q)E}{m+M}$.

18.9. $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l \cos \alpha}{g \pm a}}$; $F_{1\text{н}} = \frac{m(g \pm a)}{\cos \alpha}$; $T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l \cos \alpha}{\sqrt{g^2 + a^2}}}$;

$F_{2\text{н}} = \frac{m \sqrt{g^2 + a^2}}{\cos \alpha}$, где $a = \frac{qE}{m}$.

18.10. $\approx 4,8 \text{ кГц}$.

18.11. $9,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$.

18.12. а) $E_1 = \frac{l\tau}{2\pi\varepsilon_0 a \sqrt{l^2 + a^2}}$; $E_2 = \frac{\tau \sqrt{2}}{4\pi\varepsilon_0 a} \sqrt{1 - \frac{a}{\sqrt{4l^2 + a^2}}}$;

б) $F = \frac{\rho l \tau (2a^2 + l^2) \sin \beta}{2\pi\varepsilon_0 a^2 (l^2 + a^2)^{3/2}}$.

18.13. а) 0,76 В/м; б) 0,83 В/м; в) ≈ 5 В/м.

$$18.14. E_1 = \frac{\sigma \sin \varphi/2}{\epsilon_0}; E_2 = \frac{\sigma \cos \varphi/2}{\epsilon_0}.$$

$$18.15. \sigma_1 = \frac{q_1 \pm q_2}{2S}; \sigma_2' = \frac{q_2 \pm q_1}{2S}.$$

$$18.16. E = \frac{\rho_0}{\epsilon_0} x \left(0 \leq x \leq \frac{d}{2} \right); E = \frac{\rho_0}{\epsilon_0} \frac{d}{2} \frac{x}{|x|} \left(\frac{d}{2} \leq x \leq \infty \right).$$

$$18.17. E = \frac{qx}{2\pi\epsilon_0 (R^2 - r^2)} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right). \text{ а) } E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right);$$

$$\text{б) } E = \frac{qx}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

$$18.18. \rho = \frac{3\epsilon_0 (E - E_0)}{h} \approx -1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/м}^3.$$

$$18.19. F = \frac{(q_1 + q_2) q_3}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

$$18.20. E = \frac{(ML - ml) g}{QL - ql}; v = L \sqrt{\frac{(ML - ml) g}{ML + ml^2}}; 0.$$

$$18.21. \approx 1,6 \cdot 10^3 \text{ кВ.}$$

$$18.22. \varphi_c = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} + \frac{1}{l} \right); \varphi_c = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{r} \right).$$

$$18.23. \vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho}{3\epsilon_0} \left[\frac{R^3 \vec{x}}{x^3} - \frac{r^3 (\vec{x} - \vec{l})}{|\vec{x} - \vec{l}|^3} \right], & |x| > R; \\ \frac{\rho}{3\epsilon_0} \left[\frac{\vec{x}}{x} - \frac{r^3 (\vec{x} - \vec{l})}{|\vec{x} - \vec{l}|^3} \right], & |x| \leq R, |x - l| > r; \\ \frac{\rho \vec{l}}{3\epsilon_0}, & |x - l| \leq r. \end{cases}$$

$$18.24. F_1 = \frac{q^2 R}{4\pi\epsilon_0 r (R^2 - r^2)^2}. \text{ а) } F_2 = \frac{q^2 r^3 (2R^2 - r^2)}{4\pi\epsilon_0 (R^2 - r^2)^2 R^3}; \text{ б) } F_3 = F_1 - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

18.25. а) $\varphi_c = 0$; $\varphi = \frac{r^3 - R^3}{R^2} E_0 \cos \varphi$, где φ — угол между полем и радиус-вектором, проведенным из центра шара в данную точку поля; б) $\sigma = 3\epsilon_0 E_0 \cos \varphi$; в) $F = \frac{4}{9} \pi \epsilon_0 r^2 E_0^2$.

$$18.26. \Delta\varphi = \frac{r\sigma (\pi - 2)}{2\pi\epsilon_0}.$$

$$18.27. U_{1-2} = 0; U_{2-3} = \frac{8\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon_2}; U_{1-2} = \frac{4\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon_1}; U_{2-3} = \frac{8\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon_2}.$$

$$18.28. \Delta\varphi = \frac{m}{2e} \omega_3^2 R_3 \hbar \sin 2\varphi \approx 2,9 \cdot 10^{-11} \text{ В.}$$

$$18.29. 2 \cdot 10^{10} \text{ Дж.}$$

$$18.30. \Delta W = \frac{21q^2}{32 \cdot 8\pi\epsilon_0 r}.$$

$$18.31. v = \frac{1,2e}{\sqrt{\pi\epsilon_0 ml}}.$$

$$18.32. r = \sqrt[3]{\frac{q^2}{128\pi^2 \epsilon_0 \sigma}}.$$

18.33. а) $x \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м; б) $x = \frac{ekl^2(l+3L)\sqrt{m}}{12Wd\sqrt{2W}}$.

18.34. $x = \frac{4e^2}{\pi\epsilon_0 m (v_1 + v_2)^2}$; v_2 и v_1 .

18.35. а) $E = 31,8x^{-1}$ В/м; б) $6 \cdot 10^6$ м/с; $\approx 5,4 \cdot 10^{16}$ м/с²;

в) $n = n_0 \left(\frac{x}{r}\right)^{-\frac{eu}{kT}} \left(\ln \frac{R}{r}\right)^{-1}$.

18.36. 11 пФ.

18.37. $C = 2\pi\epsilon_0\epsilon r$.

18.38. $C \approx \pi\epsilon_0 \left(\ln \frac{l}{r}\right)^{-1}$.

18.39. а) $\frac{5}{3}$ пФ; б) 10^{-6} Кл/м³.

18.40. $\varphi = \frac{C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2 + C_3\varphi_3}{C_1 + C_2 + C_3}$.

18.41. а) $C_1 = 4,5C$; б) $C_2 = 1,5C$; в) $C_3 = 2C$; г) $C_4 = \frac{12}{13}C$.

18.42. $C = \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon+1)rR}{R-r}$.

18.43. а) $q_1 = q_2 = \frac{C_1C_2(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2)}{C_1 + C_2}$; б) $q_1 = \frac{17}{20}C\mathcal{E}$; $q_2 = \frac{6}{20}C\mathcal{E}$; $q_3 = \frac{11}{20}C\mathcal{E}$.

18.44. $U = \frac{C_1(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)^2}U_0$.

18.45. $U_0 = \frac{C_1(U_1 - U_2) + C_2U_2}{C_1(U_1 - U_2) + C_2U_1}U_1$; $C_3 = \frac{C_1C_2(U_2 - U_1)}{(C_1 + C_2)U_1 - C_1U_2}$.

18.46. $U = \frac{d_1d_2\mathcal{E}}{d_1d_2 + d_2d_3 + d_3d_1}$; $\frac{d_1}{d_2}$; $\frac{d_1 + d_2}{d_1}$.

18.47. 1,75 кВ.

18.48. а) $q_1 = \frac{2}{7}C\mathcal{E}$; $q_2 = \frac{1}{4}C\mathcal{E}$; $q_3 = \frac{3}{14}C\mathcal{E}$; б) $q'_1 = (C_2 - C_1)\mathcal{E}_1 - C_1\mathcal{E}_2$;

$q'_2 = C_1 \left(\mathcal{E}_1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \mathcal{E}_2 \right)$.

18.49. а) $q_1 = \frac{R_1 \cdot R_2^2 \cdot q_0}{(R_1 + R_2)(R_1R_3 + R_2R_3 - R_1R_2)}$; б) $q_2 = \frac{R_1R_3q_0}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_2 + R_3)}$.

18.50. а) $W_1 = \infty$; $W_2 \approx 0,1$ Дж; б) $W_1 = 0$; $W_2 = 0,2$ Дж; в) $W_1 = 0$; $W_2 = 0,2$ Дж.

18.51. $\Delta W = \frac{(\sqrt[3]{4}-1)ezN_A}{10\epsilon_0} \sqrt[3]{\frac{\rho}{4} \left(\frac{ez}{\pi}\right)^2} \approx 1,65 \cdot 10^{12}$ Дж.

18.52. $W_1 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 l} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{3}{2} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{4}{3} \right)$; $W_2 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_2 l (2\epsilon_1 - \epsilon_2)} \ln \left(2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)$.

18.53. $A = \frac{C_1C_2(\epsilon \mp 1)U^2}{2\epsilon(C_2 + \epsilon C_1)}$.

18.54. а) $Q_1 = 0,33C\mathcal{E}^2$; б) $Q_2 = 8C\mathcal{E}^2$.

18.55. а) $A_1 = \frac{q^2d}{2\epsilon_0S}$; б) $A_2 = \frac{3\epsilon_0S\mathcal{E}^2}{4d}$; в) 4 Дж; $\approx 6 \cdot 10^{-9}$ Дж.

18.56. $1,05 \cdot 10^{-4}$ Дж.

$$18.57. U = \sqrt{\frac{2\sigma l^2}{\epsilon_0(\epsilon + 3)}}.$$

$$18.58. F_1 = \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1) b U^2}{2d}; F_2 = \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1) a (bU)^2}{2d [\bar{a} + (\epsilon - 1) x]^2}.$$

$$18.59. h = \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1) U^2}{\rho g (R^2 - r^2) \ln(R/r)}.$$

$$18.60. A_1 = \frac{\epsilon_0 R^2 U^2 \varphi}{2d}; A_2 = \frac{3\epsilon_0 R^2 U^2 \varphi}{2d}.$$

$$18.61. \frac{F_1}{F_0} = \frac{q_1 l^2}{q_2 (l-d)^2}; \frac{F_2}{F_0} = \frac{q_2 l^2}{q_1 (l-d)^2}.$$

$$18.62. F = \frac{(2\sqrt{2}-1) q^2}{32\pi\epsilon_0 d^2}.$$

$$18.63. A = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 h}.$$

$$18.64. \text{a) } F_H = 3mg + \frac{3}{4} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 l^2}; \text{б) } \omega = \sqrt{\frac{q}{l} + \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 m l^3}}.$$

$$18.65. \text{a) } 2,4 \cdot 10^5 \text{ В/м; б) } 8 \text{ Н.}$$

$$18.66. E_0 = \frac{ql}{2\pi\epsilon_0 (4l^2 + R^2)^{3/2}}, \varphi_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R} - \frac{q}{\sqrt{R^2 + 4l^2}} \right).$$

$$18.67. C = \frac{8\pi\epsilon_0 \epsilon r R}{2R - r}.$$

$$19.1. \approx 0,13 \text{ мА.}$$

$$19.2. 2,25 \cdot 10^{-2}.$$

$$19.3. I = \frac{2SU}{(2\rho_0 + \rho_1) l}; E = \frac{2U(\rho_0 l + \rho_1 x)}{l^2 (2\rho_0 + \rho_1)}.$$

$$19.4. 0,26 \text{ Ом.}$$

$$19.5. \text{a) } r; \text{б) } r; \text{в) } 2r.$$

$$19.6. \text{a) } 5,46 r; \text{б) } \frac{r}{\sqrt{2}}.$$

$$19.7. \text{a) } 0,5r; \text{б) } R_{1,2} = 0,5r; R_{3,4} = \frac{5}{12} r; \text{в) } R_{1,2} = \frac{5}{6} r; R_{1,3} = \frac{3}{4} r; R_{1,4} = \frac{7}{12} r;$$

$$\text{г) } \frac{6}{7} r; 0,8 r; \frac{31}{30} r; \frac{8}{15} r.$$

$$19.8. 0,5r.$$

$$19.9. R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

$$19.10. \text{a) } I = \frac{(\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1) CU}{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 (\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2)}; \text{б) } E_1 = \frac{\rho_1 U}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}; E_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} E_1;$$

$$\text{в) } \sigma = \epsilon_0 (\epsilon_2 E_2 - \epsilon_1 E_1); \sigma_1 = \epsilon_0 [(1 - \epsilon_1) E_1 + (1 - \epsilon_2) E_2].$$

$$19.11. \text{a) } q = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\epsilon_0 \epsilon \rho}\right); \text{б) } Q = \frac{q_0^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right).$$

$$19.12. I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{24R}.$$

$$19.13. R_r = \frac{(R_1 - R_2) r}{R_2}.$$

$$19.14. x = \frac{mn - 1}{m + n - 2}.$$

19.15. $\approx 0,67$ А.

$$19.16. I_3 = U_1 \left[\frac{U_1}{I_1} + \frac{I_1 I_2 R^2}{(I_2 - I_1) U_1} - 2R \right]^{-1};$$

$$U_3 = \left(\frac{I_1 I_2 R^2}{I_2 - I_1} - U_1 R \right) \left[\frac{U_1}{I_1} + \frac{I_1 I_2 R^2}{(I_2 - I_1) U_1} - 2R \right]^{-1}.$$

19.17. 11 В; 9,1 Ом.

19.18. 12 В.

19.19. 5,4 А.

19.20. 2,24.

$$19.21. I_{1 \text{ макс}} = \frac{\mathcal{E}}{r}; I_{2 \text{ макс}} = \frac{5}{3} \frac{\mathcal{E}}{r}; I_{1 \text{ мин}} = \frac{2}{3} \frac{\mathcal{E}}{r}; I_{2 \text{ мин}} = \frac{4}{3} \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

$$19.22. \text{ а) } r_A \leq \frac{11(3z - 100\%)}{5(100\% - z)} R; \text{ б) } r_V \geq \frac{6}{11} \left(\frac{100\%}{z} - 1 \right) R.$$

19.23. 15 Ом; 30 Ом.

$$19.24. U_C = \frac{R\tau}{(R-r)\tau + rT} U_0.$$

$$19.25. I_1 = \frac{\mathcal{E}}{7R}; I_2 = I_1.$$

19.26. $\approx 5 \cdot 10^{-3}$ 1/К.

19.27. а) 6,8 В; б) 13,4 ч.

19.28. $R \leq 20,25$ Ом.

19.29. 0,95 В.

$$19.30. U_3 = \frac{3U_1 U_2}{4U_1 - U_2}.$$

$$19.31. k_1 = \sqrt{\frac{nr}{R}}; m_1 = \sqrt{\frac{nR}{r}}; k_2 = \sqrt{\frac{nR}{r}}; m_2 = \sqrt{\frac{nr}{R}}.$$

19.32. 0,485 А.

$$19.33. \text{ а) } I_r = \frac{\mathcal{E}_1 R_2 - \mathcal{E}_2 R_1}{R_1 R_2}; \text{ б) } I_r = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R + r_1 + r_2}; U = \frac{\mathcal{E}_1 (R - r_2) + \mathcal{E}_2 r_1}{R + r_1 + r_2};$$

$$\text{ в) } \varphi_A = \frac{9R + 8r}{6R + 7r} \mathcal{E}; \text{ г) } U = \frac{(r_1 + r_2) \Delta\varphi + r_3 (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) + (r_1 + r_2) \mathcal{E}_2}{r_1 + r_2 + r_3}.$$

19.34. а) 0,6 А; $\approx 7,3$ А; б) 13 А.

19.35. 20 мА; 5 мА; 6,7 мА; 7,5 мА.

$$19.36. U = 2,26\mathcal{E}; I = 2,7 \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

$$19.37. q_1 = \frac{3R + 5r}{R + 3r} C\mathcal{E}; q_2 = C(\mathcal{E}_1 + IR - \mathcal{E}_2); q_3 = \frac{C}{2}(2\mathcal{E} + \varphi_1 - \varphi_2);$$

$$q'_3 = \frac{C}{2}(\varphi_1 - \varphi_2 - 2\mathcal{E}); q_4 = \frac{C}{3}(3\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1); q_5 = \frac{7}{3} C\mathcal{E}_1.$$

19.38. а) 3,35 кДж; б) 1 кДж; в) 470 Дж; 40 Дж.

$$19.39. m_1 \approx 880 \text{ кг}; m_2 = \frac{m_1}{9}.$$

19.40. а) ≈ 420 Вт; б) ≈ 136 Вт.

$$19.41. P = \frac{\mathcal{E}^2 l (l-x)x}{\rho(0,5l^2 + lx - x^2)^2}.$$

$$19.42. P = \frac{2(n-2)R\mathcal{E}^2}{(nr + 2R - 2r)^2}.$$

19.43. ≈ 33 Вт; 50%.

19.44. 48 Вт; 50 Вт.

$$19.45. P_i = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{R + r_1 + r_2} \mathcal{E}_i; \eta_1 = \frac{(R + r_2) \mathcal{E}_1 + r_1 \mathcal{E}_2}{(R + r_1 + r_2) \mathcal{E}_1}; \eta_2 = \frac{r_2 \mathcal{E}_1 + (R + r_1) \mathcal{E}_2}{(R + r_1 + r_2) \mathcal{E}_2};$$
$$P = \frac{(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2)^2}{R + r_1 + r_2}; \eta = \frac{R}{R + r_1 + r_2}.$$

19.46. 25 А·ч; 62,5%.

$$19.47. Q = \frac{C}{2} (\mathcal{E} - U_0)^2.$$

19.48. 65%.

$$19.49. I_2 = 2\sqrt{2} I_1.$$

19.50. ≈ 67 К.

$$19.51. l_2 = l_1 \sqrt[3]{\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2}; d_2 = d_1 \sqrt[3]{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2}.$$

$$19.52. t_2 = \frac{U^2 + PR + \sqrt{(U^2 + PR)^2 + 4\alpha t_1 U^4}}{2\alpha U^2}.$$

19.53. 44 мин.

19.54. 120 Вт.

19.55. 75%; 2,4 кВт; 20 А.

$$19.56. n = \frac{I(\mathcal{E} - IR)}{2\pi M}.$$

19.57. 4 об/с; 6 об/с.

19.58. 0,175 Вт.

$$19.59. \frac{I_0}{I} \approx 1,056.$$

19.60. $4,15 \cdot 10^{-9}$ Кл.

19.61. $\approx 1,5 \cdot 10^9$.

$$19.62. \text{ а) } p = \frac{I}{\pi\gamma Dh} \sqrt{v_0^2 + 2\gamma U}; \text{ б) } \rho(x) = \frac{I}{2\pi x h} \left[v_0^2 + 2\gamma U \frac{\ln x/d}{\ln D/d} \right]^{-1/2}.$$

$$19.63. t = \frac{2mAP}{e^2 N_A E^2 \rho}.$$

19.64. 390 Дж/(м·с·К).

19.65. ≈ 15 В.

19.66. $\approx 9,6$ эВ.

$$19.67. j = \frac{neN_A \rho}{A} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}} \exp\left(-\frac{A_{\text{выл}}}{kT}\right).$$

19.68. $\approx 0,1$ А.

19.69. 3,1 эВ.

19.70. $\approx 1,15$.

19.71. $7 \cdot 10^8$ 1/м³; 18,5 мин.

19.72. $2 \cdot 10^9$ пар/(с·см³).

19.73. 0,16 мА.

$$19.74. j = \frac{n_0 e}{\alpha} [\exp(\alpha d) - 1].$$

19.75. $1,4 \cdot 10^{12}$ 1/м³.

$$19.76. U = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

19.77. $5 \cdot 10^{18}$; 1,6 A.

19.78. $\approx 2,5$.

19.79. $\approx 2,8$ A.

19.80. $\approx 7 \cdot 10^5$ Па.

19.81. $\approx 1,6$ A.

19.82. $\approx 0,45$.

$$20.1. B_1 = \frac{2\rho g S \operatorname{tg} \alpha}{I}; B_2 = \frac{4\rho g S \operatorname{tg} \alpha}{\pi I}.$$

20.2. $2,3 \cdot 10^5$ Тл.

20.3. 2,5 A, $15,5^\circ$.

20.4. 180.

$$20.5. \frac{\partial B}{\partial x} = \frac{mg}{\pi r^2 I}.$$

$$20.6. \varepsilon = \frac{IB}{m}; P = \pi n R^2 IB.$$

20.7. 10^{-4} Н.

$$20.8. H = \frac{I(1 \pm \cos \alpha/2)}{2\pi x \sin \alpha/2}.$$

$$20.9. H = \frac{jb}{2\pi} \ln \frac{x+a}{x}.$$

$$20.10. B_n = \frac{\mu_0 n I R^2 \sin 2\pi/n}{4\pi (R^2 \cos^2 \pi/n + x^2)}; B_3 = \frac{3}{4\pi} \sqrt{\frac{3}{7}} \frac{\mu_0 I}{R}; B_4 = \frac{\sqrt{2}}{3\pi} \frac{\mu_0 I}{R};$$
$$B_\infty = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}.$$

20.11. $4,2 \cdot 10^{-6}$ Тл.

$$20.12. \text{a) } B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi l} \left(\varphi - \operatorname{tg} \varphi + \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{2 \cos \varphi}} \right); \text{б) } B = \frac{\mu_0 I}{2\pi l} \left(\varphi + \frac{1}{\cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \right).$$

$$20.13. B = \frac{\mu_0 n I}{2(R-r)} \ln \frac{R}{r}.$$

$$20.14. \text{a) } B_1 = \frac{\mu_0 q \omega}{\pi R}; \text{б) } B_2 = \frac{\mu_0 \rho_0 \omega R^2}{2}.$$

$$20.15. \text{a) } F = \frac{\mu_0 a b I_1 I_2}{2\pi x(x+a)}; F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{r+x}{x}; \text{б) } F = \frac{\mu_0 a^2 I_1 I_2}{2x^2}.$$

$$20.16. F_M = \frac{3}{2} \frac{\mu_0}{\pi} \frac{\rho_1 \rho_2}{l^4}; F_3 = \frac{3}{2} \frac{\rho_1 \rho_2}{\pi \varepsilon_0 l^4}.$$

20.17. 0,4 Па.

20.18. $1,8 \cdot 10^{-5}$ Тл.

20.19. 1,6; $5,65 \cdot 10^{-6}$ Вб.

20.20. 320 Н.

$$20.21. \frac{W}{l} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \frac{a-r_0}{r_0}.$$

$$20.22. w(x) = \frac{\mu_0}{8\pi^2} \left(\frac{I}{a} \right)^2 x^2 (0 \leq x \leq a); w(x) = \frac{\mu_0}{8\pi^2} \left(\frac{I}{x} \right)^2 (a \leq x \leq b);$$

$$w(x) = \frac{\mu_0}{8\pi^2} \left(\frac{I}{c^2 - b^2} \right)^2 \left(\frac{c^2 - x^2}{x} \right)^2 (b \leq x \leq c);$$

$$20.23. w = \frac{\mu_0}{8} (jd)^2.$$

$$20.24. \omega = \frac{\mu_0}{8\pi^2} \left(\frac{q\omega}{R} \right)^2; \quad \rho_m = \frac{q\omega R^2}{5\pi}.$$

$$20.25. 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

$$20.26. A_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} a \ln \frac{2x+a}{2x-a} I_1 I_2; \quad A_2 = 2A_1.$$

$$20.27. x = \frac{\pi\mu_0}{k} \left(\frac{NrI}{l} \right)^2 - \frac{2mg}{k}.$$

$$20.28. \text{ а) } F = eB \sqrt{\frac{2W_0}{m}}; \quad \text{ б) } R = \frac{\sqrt{2W_0 m}}{eB}; \quad \text{ в) } T = \frac{2\pi m}{eB}; \quad \text{ г) } \rho_m = \frac{W_0}{B}.$$

$$20.29. dv = \frac{eB}{4\pi m}.$$

$$20.30. \text{ а) } I = \frac{4\pi \cos \alpha}{\mu_0 N} \left(\frac{2U}{e/m} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \text{ б) } t = \frac{4\pi ml}{\mu_0 eNI}; \quad \text{ в) } x = x_0 + \sqrt{\frac{eU}{m}} (\cos \alpha) t;$$

$$\rho = \sqrt{\frac{2U}{em}} \frac{l \sin \alpha}{emNI}; \quad \varphi = \varphi_0 + \frac{l}{m} \frac{\mu_0 \cdot NI}{l} t; \quad \text{ г) } \rho = \frac{Ul \sin^2 \alpha}{2\mu_0 NI}.$$

$$20.31. \approx 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2; \quad x = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$20.32. r_{\text{макс}} = r_0 \exp \frac{2\pi m v_0}{\mu_0 q I}.$$

$$20.33. F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sqrt{1 + (\epsilon_0 \mu_0 v_1 v_2 \sin \alpha)^2}.$$

$$20.34. 10^{-4} \text{ А/м}^2.$$

$$20.35. x = vt \cos \alpha - \frac{\gamma E}{2} t^2; \quad R = \frac{v \sin \alpha}{\gamma B}.$$

$$20.36. \text{ а) } x = \frac{E}{B} t - \frac{E}{\gamma B^2} \sin(\gamma B t); \quad y = \frac{E}{\gamma B^2} [1 - \cos(\gamma B t)]; \quad \text{ б) } W_{\text{макс}} = 2m \left(\frac{E}{B} \right)^2;$$

$$\text{ в) } t = \frac{\pi E}{\gamma B^2};$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \left(v_0 - \frac{E}{B} \right) \frac{[\sin(\gamma B t)]}{\gamma B} + \frac{E}{B} t; \\ y &= \left(v_0 - \frac{E}{B} \right) \frac{[\cos(\gamma B t) - 1]}{\gamma B}. \end{aligned} \right\}$$

$$20.37. 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Тл.}$$

$$20.38. 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}; \quad 5,7 \cdot 10^{-3}.$$

$$20.39. 10^{-6} \text{ В}; \quad 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ В}; \quad 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ В}; \quad 0.$$

$$20.40. q_{\text{макс}} = \frac{mB}{2\pi\rho D}; \quad q = \frac{q_{\text{макс}}}{2}.$$

$$20.41. 47 \text{ мкВ.}$$

$$20.42. \text{ а) } U = \frac{2\mathcal{E}R - \omega^2 Blr}{2(R+r)}; \quad \text{ б) } P_Q = \frac{(2\mathcal{E} + \omega Bl)^2 R}{4(R+r)^2}; \quad \text{ в) } N = \frac{(2\mathcal{E} + \omega Bl) \omega Bl^2}{4(R+r)}.$$

$$20.43. I = \frac{\omega BD}{4r [2 + \omega t - (\omega t)^2 / 2\pi]}.$$

$$20.44. \text{ а) } v = \frac{mgR}{B^2 l^2 \cos \alpha} \left(\frac{\text{tg } \alpha - f}{f \text{tg } \alpha + 1} \right); \quad \text{ б) } a = \left(g - \frac{bB\mathcal{E}}{mr} \right) \exp \left(- \frac{B^2 l^2 t}{mr} \right);$$

$$v = \left(\frac{Bl\mathcal{E}}{mr} - g \right) \frac{mr}{B^2 l^2}.$$

$$20.45. \omega = \frac{qB}{2m}.$$

$$20.46. \frac{I}{I_0} = \sqrt{1 + \frac{e^3 n^2 B}{2\pi m I_0^2}}.$$

$$20.47. E = \frac{kx}{2} \quad \left(x \leq \frac{d}{2}\right); \quad E = \frac{kd^2}{8x} \quad \left(x \geq \frac{d}{2}\right).$$

$$20.48. 1,7 \cdot 10^4.$$

$$20.49. 0,14 \text{ м/с.}$$

$$20.50. \omega = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{g}{l} - \left(\frac{3}{8} \frac{B^2}{\rho D}\right)^2}.$$

$$20.51. L_1 = \frac{\mu_0}{2} n^2 \frac{r^2}{R}; \quad L_2 = \mu_0 n^2 (R - \sqrt{R^2 - r^2}).$$

$$20.52. 3,2 \text{ мкГн}; \quad \approx 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

$$20.53. \text{ а) } L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r}; \quad \text{ б) } L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{1}{4}\right).$$

$$20.54. M = \mu_0 \mu n N S.$$

$$20.55. 6 \text{ мГн.}$$

$$20.56. M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\left(1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}\right) \ln \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 1 \right];$$

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \left[\left(1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}\right) \ln \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 1 \right].$$

$$20.57. U = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right); \quad U = U_0 \cos \frac{t}{\sqrt{LC}}.$$

$$20.58. T = RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3}.$$

$$20.59. 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

$$20.60. 2,9 \text{ В.}$$

$$20.61. I_{1\text{макс}} = q \sqrt{\frac{L_2}{(L_1 + L_2) L_1 C}}; \quad I_{2\text{макс}} = q \sqrt{\frac{L_1}{(L_1 + L_2) C L_2}}.$$

$$20.62. \text{ а) } I = \frac{\mathcal{E}}{L} \exp\left(-\frac{R+r}{L} t\right);$$

$$\text{ б) } \dot{W} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r} \left[1 - \exp\left(-\frac{R+r}{L} t\right)\right] \exp\left(-\frac{R+r}{L} t\right);$$

$$\dot{Q} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r} \left[1 - \exp\left(-\frac{R+r}{L} t\right)\right]^2; \quad \text{ в) } P = I^2 R + I \mathcal{E} \exp\left(-\frac{R+r}{L} t\right);$$

$$\text{ г) } I = \frac{\mathcal{E}}{2R+r} \left[1 + \frac{R}{R+r} \exp\left(-\frac{2R+r}{L} t\right)\right].$$

$$20.63. \text{ а) } I = [6 + 5 \exp(-50t)]; \quad \text{ б) } U_C = 5 [1 - \exp(-4 \cdot 10^4 t)].$$

$$20.64. T_1 = 4\pi \sqrt{\frac{m l I}{4mgL - B^2 l^3}}; \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{4ml - B^2 l^3 C}{mg}}.$$

$$21.1. \text{ а) } I_0 = \frac{mBf}{2\rho D}; \quad I_{\pi} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad \text{ б) } I = \frac{mf_0 B}{2\rho D} \sin\left(\frac{2\pi f_0}{k} \cos kt\right) \sin kt.$$

$$21.2. I = \frac{\omega S B \sin(\omega t + \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}; \quad P = \frac{(\omega S B)^2 R}{2(R^2 + \omega^2 L^2)}.$$

$$21.3. \text{ а) } I_{\text{cp}} = I_0/2; \quad I_{\pi} = I_0/\sqrt{2}; \quad \text{ б) } I_{\text{cp}} = I_0/2; \quad I_{\pi} = I_0/\sqrt{3}; \quad \text{ в) } I_{\text{cp}} = 2I_0/\pi;$$

$$I_{\pi} = I_0/\sqrt{2}; \quad \text{ г) } I_{\text{cp}} = 0; \quad I_{\pi} = I_0/\sqrt{3}.$$

$$21.4. \text{ а) } z_1 = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \text{ б) } z_2 = \frac{\omega RL}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}};$$

$$\text{ в) } z_3 = \frac{(\omega L - 1/\omega C) \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \text{ г) } z_4 = \frac{\omega RL}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2 (1 - \omega^2 LC)^2}};$$

$$\text{ д) } z_5 = z_2.$$

21.5. 3 мкФ.

$$21.6. \text{ а) } I_1 = \frac{U_0 \cos(\omega t + \varphi_1)}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \text{ tg } \varphi_1 = \frac{1}{\omega R_1 C}; I_2 = \frac{U_0 \cos(\omega t - \varphi_2)}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L^2}};$$

$$\text{ tg } \varphi_2 = \frac{\omega L}{R_2}; I_3 = \frac{U_0 \sin \omega t}{\omega L - 1/\omega C}; \text{ б) если } L = CR_1 R_2.$$

$$21.7. \frac{U_1}{U_2} = \frac{R(\omega^2 LC - 1)}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2 (\omega^2 LC - 1)^2}}.$$

$$21.8. U = U_0 \left(\sqrt{\frac{2}{2 - \omega^2 LC}} \right)^n.$$

$$21.9. P = \frac{U^2}{2} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{R_1}{(R_1 + 2R_2)^2} \right].$$

21.10. а) 0,686 А; $\varphi \approx 55^\circ$; 109 В; 69 В; б) 48 Вт; 200 мкФ; в) = 1,3 А; $\approx 24^\circ$.

21.11. 96,8 кВт; 5,6 В.

$$21.12. P = \frac{U_0^2 - U_1^2 - U_2^2}{2R}; P = \frac{(I_0^2 - I_1^2 - I_2^2) R}{2}.$$

$$21.13. A_0 = U_0 \left[1 - \exp\left(\pi n R \sqrt{\frac{C}{L}}\right) \right]^{-1}.$$

$$21.14. t = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \text{arctg } n.$$

21.15. а) 0,628 А; б) $2,5 \cdot 10^{-5}$ Дж.

$$21.16. \text{ а) } U = 80 [\exp(-12,5t)] \cos 790t; \text{ б) } \approx 0,1; \text{ в) } \frac{t}{T} = \frac{1}{2\pi} \text{arctg } 20\pi;$$

$$\text{ г) } W(t) = 3,2 \cdot 10^{-3} [\exp(-25t)] (1 + 1,57 \cdot 10^{-2} \sin 1600t + 4,9 \cdot 10^{-4} \sin^2 800t);$$

д) 10^3 ; е) $\approx 20\%$.

21.17. $2 \cdot 10^{-3}$ Вт.

21.18. $\approx 2,8$ Ом.

21.19. 223 Гц; 206 Гц, 240 Гц.

21.20. а) $I = 7,1 \cdot 10^{-2} \sin 10(5t - 10)$; б) 71 Гц; в) $\approx 1,75 \cdot 10^{-3}$ Вт.

22.1. 299700 ± 250 (км/с).

22.2. $3,0 \cdot 10^8$ м/с.

22.3. $3,07 \cdot 10^8$ м/с.

$$22.4. x = \frac{\left(1 + \text{ctg } \frac{\alpha}{2}\right) d}{2 \sin \alpha}; v = v_0 \text{ctg } \alpha.$$

22.5. а) $x = l \sqrt{2(1 - \cos 4\pi/n)}$ (n — целое число). б) Будут двигаться по окружности радиусом l со скоростью $v = 2\omega l$. в) Если n — целое, то число изображений $k = n - 1$. Если $n = 2i \pm \xi$, где i — целое, $\xi < 1$, то число изображений $k = 2i$.

22.6. б) 1; в) 11.

$$22.7. R = \frac{2l(L \pm l)}{L \pm 2l}; R = \frac{2l(l - L)}{2L - 3l}.$$

$$22.8. \quad k_1 = \left(\frac{R}{2a - R} \right)^2; \quad k_1 = k_2^2.$$

$$22.9. \quad \text{а) } H_0 = \sqrt{H_1 H_2}; \quad \text{б) } l = L; \quad \text{в) } R = \frac{2L \sqrt{H_1 H_2}}{H_2 - H_1}.$$

$$22.10. \quad \frac{mn}{2n - 1}.$$

$$22.11. \quad 0,1 \text{ м}; \quad 0,3 \text{ м}; \quad \infty; \quad -0,3 \text{ м}; \quad -0,24 \text{ м}.$$

$$22.12. \quad \text{а) } x = 7H; \quad \text{б) } x = \frac{\sqrt{(15H)^2 + (13f)^2}}{2}.$$

$$22.13. \quad \text{Если начало координат в полюсе зеркала, то } x = \frac{R}{2} (3 - 2 \sin^2 \alpha);$$

$$y = \frac{R}{2} \sin 2\alpha.$$

$$22.14. \quad a_1 = R; \quad a_2 = \frac{2}{3} R.$$

$$22.16. \quad x = \frac{n-1}{n} d.$$

$$22.17. \quad 3,56 \text{ см}.$$

$$22.18. \quad 7,16 \text{ мм}.$$

$$22.19. \quad \text{а) } 30^\circ; \quad 3,6 \text{ мм}; \quad \text{б) } 30^\circ; \quad 6,4 \text{ мм}.$$

$$22.20. \quad \text{а) } 1,25 \text{ м}; \quad \text{б) } 0,357 \text{ м}; \quad 0,76 \text{ м}.$$

$$22.21. \quad \theta = 25\alpha; \quad n = 2 \cos \frac{\alpha}{2} \sqrt{4 \cos^2 \alpha + 4 \cos \alpha \cos \frac{\alpha}{2} + 1}.$$

$$22.22. \quad \theta = 2 \arcsin \left(n \sin \frac{\varphi}{2} \right) - \varphi; \quad \varphi = 2 \arccos \frac{n}{2}.$$

$$22.23. \quad \approx 8,7^\circ; \quad \approx 26^\circ.$$

$$22.24. \quad 16^\circ.$$

$$22.25. \quad -\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}.$$

$$22.26. \quad \alpha = 2 \arcsin \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \left(\frac{R+r}{R-r} \right)^2}.$$

$$22.27. \quad \text{а) } \approx 0,265 \text{ м}; \quad \text{б) } 0,14 \text{ м}.$$

$$22.28. \quad y = \pm \frac{1}{n_2} \sqrt{2f(n_2 - n_1)n_2 x - (n_2^2 - n_1^2)x^2}.$$

$$22.29. \quad f = \frac{n_2 a R}{n_1 R + (n_2 - n_1) a}.$$

$$22.30. \quad \Phi = (\sqrt{lL} - l)^{-1}; \quad \Phi = (l \pm \sqrt{lL})^{-1}; \quad \Phi = (L - l \pm \sqrt{L^2 - Ll})^{-1}.$$

$$22.31. \quad 3,3 \text{ дптр}.$$

$$22.32. \quad 18,7 \text{ дптр}.$$

$$22.33. \quad 1,05 \text{ см}; \quad 4,5 \text{ см}.$$

$$22.34. \quad 1,5 \text{ см}.$$

$$22.35. \quad \frac{\sqrt{4f^2 + l^2} + l}{\sqrt{4f^2 + l^2} - l}.$$

$$22.36. \quad \text{а) } 0,2 \text{ м}; \quad 2,5 \text{ дптр}; \quad \text{б) } 0,05 \text{ м}; \quad -20 \text{ дптр}.$$

$$22.37. \quad 0,14 \text{ м}; \quad 0,07 \text{ м}.$$

$$22.38. \text{ а) } \Phi_1 = \frac{1}{n_2} \left(\frac{n-n_1}{R_1} + \frac{n-n_2}{R_2} \right); \quad \Phi_2 = \frac{1}{n_1} \left(\frac{n-n_1}{R_1} + \frac{n-n_2}{R_2} \right);$$

$$\text{ б) } b = n_2 \left(\frac{n-n_1}{R_1} + \frac{n-n_2}{R_2} - \frac{n_1}{a} \right)^{-1}; \quad \text{ в) } \Phi_1 = \frac{1}{n_2 R} (2n - n_1 - n_2);$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{n_1 R} (2n - n_1 - n_2); \quad b = n_2 (2n - 2n_1 - n_2) R.$$

$$22.39. \quad b = \frac{naR}{\pm 2a(1-n) - nR}.$$

$$22.40. \quad 0,24 \text{ м}; \quad 0,40 \text{ м}.$$

$$22.41. \text{ а) } f_c = \frac{f(2l-f)}{2(l-f)}; \quad \text{ б) } b = \frac{f}{2}; \quad h_1 = 0,5h_0; \quad b = -f; \quad h_1 = h_0.$$

$$22.42. \quad f = -a\sqrt{2}; \quad \Delta b = \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+2} a.$$

$$22.43. \text{ а) } 0,4 \text{ м}; \quad \text{ б) } 1,5 \text{ м}.$$

$$22.44. \quad \text{От линзы на расстоянии } 0,62 \text{ м}; \quad 0.$$

$$22.45. \quad b_1 = \frac{R}{2n-3}; \quad h_1 = \frac{h_0}{2n-3}; \quad b_2 = -\frac{R}{2n-1}; \quad h_2 = \frac{h_0}{2n-1}; \quad b_3 = \frac{R}{2n-1};$$

$$h_3 = \frac{h_0}{2n-1}; \quad b_4 = \frac{-R}{2n+1}; \quad h_4 = \frac{h_0}{2n+1}.$$

$$22.46. \text{ а) } f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l}; \quad \Delta_1 = \frac{l f_1}{f_1 + f_2 - l}; \quad \Delta_2 = \frac{l f_2}{l - f_1 - f_2}; \quad \text{ б) } l = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l/n};$$

$$\Delta_1 = \frac{l f_1}{n(f_1 + f_2) - l}; \quad \Delta_2 = \frac{l f_2}{l - n(f_1 + f_2)}.$$

$$22.47. \text{ а) } \Phi = 6 \text{ дптр}; \quad \text{эквивалентные фокальные плоскости удалены от первой линзы на расстояния } 0,233 \text{ и } 0,133 \text{ м, главные эквивалентные плоскости находятся от первой линзы на расстояниях } 6,6 \text{ и } 3,3 \text{ см}; \quad \text{ б) } 0,36 \text{ см}; \quad \approx 9 \text{ см}.$$

$$22.48. \quad 3,75 \text{ см}; \quad 2,25 \text{ см}.$$

$$22.49. \quad f = \frac{n_0 R}{2(n_1 - n_2)}; \quad f = \frac{R}{2(n_1 - n_2) \mp n_0 \pm 1}.$$

$$22.50. \text{ а) } -26,6 \text{ дптр}; \quad \text{ б) } \text{увеличить на } 0,34 \text{ м}; \quad \Gamma = -5.$$

$$22.51. \text{ а) } 1,10 \text{ м}; \quad 0,08 \text{ м}; \quad \text{ б) } \text{на расстоянии } 0,167 \text{ м от первой линзы}.$$

$$22.52. \text{ а) } f_1 = f_2 = \frac{R}{n-1}; \quad OH = 0; \quad OH' = \frac{n-1}{n} d;$$

$$\text{ б) } OH = |O'H'| = \frac{(n-1)Rd}{2n(n-1)R - (n-1)^2 d}; \quad f = \frac{nR^2}{2(n-1)nR - (n-1)^2 d};$$

$$d = \frac{2nR}{n-1}; \quad \text{ в) } f_1 = f_2 = \frac{R}{1-n}; \quad OH = 0; \quad OH' = \frac{n-1}{n} d;$$

$$\text{ г) } f = |f'| = \frac{nR^2}{2n(1-n)R - (n-1)^2 d};$$

$$OH = O'H' = \frac{(1-n)Rd}{2n(1-n)R - (n-1)^2 d}; \quad \text{ д) } f = \frac{n}{n-1} \frac{R}{2}; \quad OH = |O'H'| = R.$$

$$22.53. \text{ а) } d = \frac{n(R_1 - R_2)}{n-1}, \quad |R_1| > |R_2|; \quad \text{ б) } b = \frac{n(n-2)R^2}{(n-1)[(n-1)(n-2)d - nR]}.$$

$$22.57. \text{ а) } 15 \text{ см}; \quad \text{ б) } 0,3 \text{ см}.$$

$$22.58. \quad f = \frac{n-1}{n} x + \frac{R}{2n}; \quad b = \frac{[n(R-x) + x]R}{n[2n(R-x) + 2x - R]}.$$

22.59. а) 9,0 см; 5; б) 26,5 дптр.

22.60. 10 м; $1,25 \cdot 10^{-3}$ с.

22.61. 2 см.

22.62. 2,5 м.

22.63. $\approx 68^\circ$.

$$22.64. \frac{S_2}{S_1} = \left(1 + \frac{l\Phi_2}{l\Phi_1 - 1}\right)^2.$$

22.65. $\Gamma = \frac{l_0 f}{f^2 + x_1 x_2}$. При $x_1 = 0$ предмет в главном фокусе лупы; при $x_2 = 0$ глаз в заднем фокусе лупы; $\Gamma = \frac{l_0 - x_2}{f}$.

22.66. а) 16 дптр; б) 6,25 см; в) 6,0 см; г) 2,9 см.

$$22.67. 4,16 \text{ см} \leq a \leq 5 \text{ см}; \quad \beta = \frac{a(l_0 + f)}{l_0 f} = \begin{cases} 1 \\ 1,66 \end{cases}.$$

22.68. 11,5 см.

22.69. ∞ .

22.70. а) 50 см; -5 см; б) отодвинуть на 0,5 см.

22.71. $37,5 \text{ см} \leq l \leq 38 \text{ см}$.

22.72. 1,2 см; 33,0 см. Входной зрачок мнимый; $5^\circ 33'$.

22.73. а) 5; б) 2,0 см; 0,4 см; в) $38^\circ 32'$; г) $\approx 1,4$ см.

22.74. 43,7 см; 1,4 см.

22.75. 0,56 см; 365.

$$23.1. \text{ а) } \bar{E} = \frac{2I}{R^2} \left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}}\right); \quad \text{ б) } \frac{E_{\text{макс}}}{E} = \frac{R^2}{2H^2} \left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}}\right)^{-1};$$
$$\text{ в) } H = R/\sqrt{2}; \quad \text{ г) } I = \frac{EH^2}{\cos^2 \alpha}.$$

23.2. 4 м.

23.3. ≈ 700 лк.

$$23.4. E = \frac{I}{H^2} \left[\frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{(n+3)^2} \right].$$

$$23.5. E \approx 1,1 \frac{I}{l^2}.$$

$$23.6. \text{ а) } E = \frac{16}{9} (k+1) \frac{I}{R^2}; \quad \text{ б) } E = 4 (k+1) \frac{I}{R^2}; \quad \text{ в) } E = 4 \left(1 + \frac{k}{25}\right) \frac{I}{R^2}.$$

23.7. 2,25; 4.

$$23.8. E = \frac{13}{4} I_0 \Phi^2.$$

$$23.9. E = \frac{2I}{(2n-1)^2 R^2} [1 - (\sqrt{n^2 - 2n + 1})^{-1}].$$

$$23.10. \frac{t_2}{t_1} = \frac{16}{9}.$$

23.11. 0,1 лк.

23.12. 3 км; 20.

$$23.13. \frac{E_1}{E_2} = 1; \quad \frac{E_2}{E_0} \approx 0,7.$$

23.14. 225.

23.15. 33,3 лм/м²; 10,6 кд/м².

23.16. ≈ 170 м.

23.17. 6,4 м; 17 мВТ/м².

23.18. а) $1,256 \cdot 10^4$ лм; б) $1,27 \cdot 10^5$ нт; в) 80 лк; 64 лм/м²; $\approx 20,4$ нт;
г) 125,6 лм/ВТ.

23.19. пВ.

23.20. а) 10 м; 0,4 лк; б) 7,1 м; 0,25 лк.

23.21. $d\Phi = \pi B \sin 2\alpha d\alpha$; $\alpha = \pi/4$.

23.22. По диагонали куба; 350 кд.

23.23. $1,5 \cdot 10^9$ кд/м²; $5 \cdot 10^4$ лк; $1,7 \cdot 10^4$ кд/м²; $2,25 \cdot 10^4$ кд/м².

23.24. $2,6 \cdot 10^7$ нт.

23.25. $2,56 \cdot 10^5$ лм/м².

23.26. $E = \frac{\pi\Phi_0 d^2}{4a^2}$.

23.27. 4 лк; $\Gamma \leq 125$.

24.1. а) 0,5 мкм; б) 0,5 мм.

24.2. а) 0,585 мкм; 0,035; 1200; б) $I = I_0 \cos^2 \frac{\pi d\Delta x}{\lambda l}$; в) $\delta \leq 0,95$ мм.

24.3. 0,43 мм; 10.

24.4. 15 см; 5; в фокусе линзы; $\delta \leq 83$ мкм.

24.5. 4,9 мм; $d \leq 0,7$ мм.

24.6. а) $0,14(2k+1)$ мкм, $k=0, 1, 2, \dots$; б) $\frac{2k+1}{4n} \lambda \leq d \leq \frac{(2k+1)}{4\sqrt{n^2-1}} \lambda$.

24.7. $3,0^\circ$.

24.8. $\approx 8'$.

24.9. 3,1 мм; 5,2 мм; 2,3 мм; 3,9 мм.

24.10. 2500; $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 0,04\%$.

24.11. 0,50 мкм.

24.12. 0,22 м.

24.13. 2,4 дптр; 1,13 мм.

24.14. $r_k = \sqrt{\frac{k\lambda R_1 R_2}{R_1 - R_2}}$.

24.15. 1,23; 0,112 мкм.

24.16. а) $0,68 \sqrt{k}$ мм; б) $r_T = \sqrt{\frac{(2k+1)ab\lambda}{a+b}}$; $r_{CB} = \sqrt{\frac{2abk\lambda}{a+b}}$; $k=0, 1, 2, \dots$;
в) $r = 0,74 \sqrt{k}$ мм.

24.17. а) $I_1 \approx 4I_0$; $I_2 \approx 2I_0$; б) $I_3 \approx I_0$.

24.18. $0,9 \sqrt{2k+1}$ мм; $1,27 \sqrt{k}$ мм.

24.19. Для $k = \pm 1$ 33° и 27° .

24.20. 0,65 мкм.

24.21. 10^{-2} мм; 10^2 1/мм; 17; $\pi/2$.

24.22. а) 4,5 мкм; б) 1,5 мкм; в) $k=0, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9$.

24.23. 0,57 мкм; $\approx 3,9'$.

24.24. $45^\circ, 64^\circ$.

24.25. $45,5^\circ$; 2,9 мкм; 35° ; 3,6 мкм.

24.26. $\approx 3,3$ мкм.

24.27. $D = \frac{k}{\sqrt{d^2 - (d \sin \varphi_0 - k\lambda)^2}}$; $r = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{l}{\lambda}$; $\Delta\varphi = \frac{2\lambda}{N \sqrt{d^2 - (k\lambda)^2}}$.

24.28. 0,6 мм; $\approx 5,6 \cdot 10^{-4}$ мкм.

24.29. $s \ll 2,5$ мкм.

24.30. ≈ 24 км.

24.31. $\approx 34''$; 7,0 км; 42 мкм.

24.32. $\approx 0,34''$; 3,34 мкм.

24.33. $7,5 \cdot 10^4$; 4 см; 12,5.

24.34. 1,4 мкм; 30.

24.35. 50 мм.

24.36. а) $\approx 56^\circ$; б) $7 \cdot 10^{-2}$; в) $\approx 1,45 \cdot 10^{-2}$.

24.37. $66^\circ 40'$; $82^\circ 40'$.

24.38. а) $I = \frac{I_0 \sin^2 2\alpha}{8}$; б) $I = I_0 \cos^4 \alpha \sin^2 \alpha$; в) $I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha$.

24.39. 9,67 лк.

24.40. 0,25; 0,80.

24.41. В 0,152 раза; 0,82.

24.42. 490 мкм; 475 мкм; 16,2 мкм.

24.43. $\lambda = 36(4k+1)^{-1}$ мкм, где $11 \leq k \leq 22$.

24.44. 0; $I_0/4$.

24.45. $9,0 \cdot 10^{-3}$.

24.46. 4,5 мм.

24.47. 0,244 кг.

24.48. $4,75 \cdot 10^{-12}$ м/В².

24.49. 67° .

25.1. В 12 раз.

25.2. 1,05 ч.

25.3. $1,68 \cdot 10^{-6}$ с; 2,3 мкс, 5 км; 0,7 км

25.4. а) Нет; б) да; в) 0,05 с.

25.5. $1,6 \cdot 10^{-7}$ с; $0,7 \cdot 10^{-7}$ с.

25.6. с.

25.7. $v_1 = 2v$; $v_2 = \frac{2vc^2}{v^2 + c^2}$; $l = \frac{c^2 - v^2}{c^2 + v^2} l_0$.

25.8. $u'_x = \frac{u \cos \alpha - 0,5c}{1 - \frac{u \cos \alpha}{2c}}$; $u'_y = \frac{0,87u \sin \alpha - gt'}{1 - \frac{u \cos \alpha}{2c}}$; $\operatorname{tg} \alpha' = \frac{0,87 \sin \alpha}{\cos \alpha - c/2u}$.

25.9. $\Delta t = 2vl \left(\frac{n}{c} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$.

25.10. $\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$; $\tau' = \frac{0,8c - v}{\left(1 - \frac{0,8v}{c} \right) \alpha}$; $\tau'' = 0,5 \left[\tau' \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha \tau'}{c} \right)^2} + \frac{c}{a} \arcsin \frac{\alpha \tau'}{c} \right]$.

25.11. $1,78 \cdot 10^{-17}$ кг; $5,3 \cdot 10^{-9}$ кг·м/с; $m \approx 10^{10} m_0$.

25.12. $\approx 1,7 \cdot 10^{-15}$ м.

25.13. $U = \frac{m_0 c^2 (k - 1)}{e}$.

25.14. $\rho = \frac{q}{2} \sqrt{\frac{m_0}{\pi \epsilon_0 r} + \left(\frac{q}{4\pi \epsilon_0 r c} \right)^2}$.

$$25.15. \quad v = \frac{eEct}{\sqrt{(m_0c)^2 + (eEt)^2}}; \quad x = \frac{m_0c^2}{eE} \left\{ \left[1 + \left(\frac{eEt}{m_0c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}; \quad W = m_0c^2 \times \\ \times \left[\sqrt{1 + \left(\frac{eEt}{m_0c} \right)^2} - 1 \right]; \quad t = \frac{m_0c \sqrt{3}}{eE}.$$

$$25.16. \quad \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\left(\frac{eU}{\rho_0c} \right)^2 + \frac{2eU}{\rho_0c}} \sqrt{1 + \left(\frac{m_0c}{\rho_0} \right)^2}.$$

$$25.17. \quad 0,63c; 5,5 \cdot 10^{-13} \text{ H.}$$

$$25.18. \quad 0,5c; m = \frac{4}{\sqrt{3}} m_0; 0,32c; 0,64c;$$

$$25.19. \quad W = 2(\sqrt{2} - 1) m_0c^2; p_1 = m_0c; p_2 = -m_0c; v = \frac{\sqrt{2}c}{2}.$$

$$25.20. \quad v = \frac{v_0c}{c-v}; v = \frac{v_0(c+v)}{c}; v = v_0 \sqrt{\frac{v+c}{c-v}}.$$

$$25.21. \quad 250 \text{ м/с.}$$

$$25.22. \quad v = \frac{c+v}{c} v_0; I = \left(\frac{c+v}{c} \right)^2 I_0.$$

$$25.23. \quad 1,5 \cdot 10^{10} \text{ м}; \approx 2,9 \cdot 10^{29} \text{ кг.}$$

$$25.24. \quad \approx 24,7 \text{ сут.}$$

$$25.25. \quad 1,3 \cdot 10^{16} \text{ км.}$$

$$25.26. \quad T = \left(\frac{\Delta v}{v} \right)^2 \frac{mc^2}{k}.$$

$$26.1. \quad 5800 \text{ К.}$$

$$26.2. \quad 10^4 \text{ К}; \approx 7,1 \cdot 10^7 \text{ кДж}; \approx 280 \text{ м.}$$

$$26.3. \quad 4,5 \cdot 10^{23} \text{ кВт}; 1,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2; 5 \cdot 10^{12} \text{ кг/с}; \approx 3,8 \cdot 10^7 \text{ лет.}$$

$$26.4. \quad \approx 2400 \text{ К}; \approx 1,22 \text{ мкм.}$$

$$26.5. \quad 0,4.$$

$$26.6. \quad 165 \text{ \AA.}$$

$$26.7. \quad 280 \text{ К.}$$

$$26.8. \quad 4,8 \text{ К.}$$

$$26.9. \quad T_1 = T_0 + \sqrt[4]{\frac{k}{\sigma} \left(\frac{I}{2\alpha} \right)^2}.$$

$$26.10. \quad T = T_1 \left(1 + \frac{3\alpha \rho l \pi d T_1^3 \tau}{c} \right)^{-\frac{1}{3}}.$$

$$26.11. \quad 0,5 \text{ К}; \approx 84 \text{ столетия.}$$

$$26.12. \quad 2400 \text{ К.}$$

$$26.13. \quad \text{б) Формула Рэлея — Джинса, } v \leq 0,02 \frac{kT}{h} \approx 8,3 \cdot 10^5 \text{ МГц. Формула}$$

$$\text{Вина } v \geq 3,9 \frac{kT}{h} \approx 1,64 \cdot 10^8 \text{ МГц.}$$

$$26.14. \quad 0,32 \text{ мкА.}$$

$$26.15. \quad 190 \text{ км.}$$

$$26.16. \quad \text{а) } \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma M}{Rc^2}\right); \text{ б) } \approx 2,1 \cdot 10^{-4}\%; \approx 3,8\%.$$

$$26.17. \quad \text{а) } \frac{\Delta v}{v} \approx \frac{v}{c} \cos \alpha; \text{ б) } \frac{\Delta v}{v} = \left(1 - \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta \cos \alpha} \right).$$

- 26.18. $\approx 0,3$ 1/с.
- 26.19. $1,1 \cdot 10^{-5}$ Па.
- 26.20. $6,4 \cdot 10^6$ Па.
- 26.21. $2,52 \cdot 10^{13}$ 1/м³; $7,56 \cdot 10^{21}$ 1/(м² · с).
- 26.22. $6 \cdot 10^8$ Н; $9,65 \cdot 10^8$ Н; $9 \cdot 10^8$ Н.
- 26.23. 0,9 мкм.
- 26.24. $7,2 \cdot 10^8$ Па; $8,6 \cdot 10^{14}$ Па.
- 26.25. $P = \frac{\pi}{3\epsilon_0 c^3} \left(\frac{\tau q^2 x}{mR^2} \right)^2$; $\beta = \frac{\tau q^3}{3\epsilon_0 c^3 m^2 R^2}$.
- 26.26. $6,5 \cdot 10^5$ м/с; $\approx 0,33$ мкм.
- 26.27. $7,4 \cdot 10^5$ м/с; 1,6 В; $\Delta U = \frac{hc}{e} \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2} = 1,55$ В.
- 26.28. $1,14 \cdot 10^9$ МГц.
- 26.29. 1,9 В.
- 26.30. 54 мкА; $\approx 3,4 \cdot 10^{14}$ 1/с.
- 26.31. $1,2 \cdot 10^{30}$ 1/(м² · с).
- 26.32. а) 0,28 мкм; б) $6,4 \cdot 10^5$ м/с; в) $1,1 \cdot 10^6$ м/с.
- 26.33. $\pi/2$; $1,6 \cdot 10^{-14}$ Дж; $3,8 \cdot 10^{-15}$ Дж.
- 26.34. а) 0,196 МэВ; б) $\approx 57\%$; в) 0,264 МэВ.
- 26.35. а) $4,8 \cdot 10^{-6}$ мкм; б) 0,34 МэВ; $3,64 \cdot 10^{-22}$ кг · м/с; в) 0,255 МэВ; $3 \cdot 10^{-22}$ кг · м/с.
- 26.36. а) $\approx 51^\circ$; б) $28,5^\circ$.
- 26.38. $1,2 \cdot 10^{-6}$ мкм; 0,17 МэВ.
- 26.39. 0,12 Å.
- 26.40. $5,7 \cdot 10^{-5}$ мкВт.
- 27.1. а) $2,4 \cdot 10^{-13}$ м; $\approx 2,8 \cdot 10^{-13}$ м; б) 0; $1,2 \cdot 10^{-13}$ м; в) $\approx 9 \cdot 10^{-20}$ кг · м/с; $6,4 \cdot 10^{-20}$ кг · м/с; г) 0,72 МэВ.
- 27.2. а) $\approx 1,55 \cdot 10^5$; б) $\approx 1,5 \cdot 10^7$.
- 27.3. а) $0,53 \cdot 10^{-10} n^2$ м; б) $13,6 n^{-2}$ эВ; $E_{св} = 13,6$ эВ; в) 10,2 В; г) 12,5 Тл; д) $L = \frac{e}{2mc}$.
- 27.4. Между уравнениями с $n_1 = 2 \sqrt{\frac{\lambda_1 R}{\lambda_1 R - hc}}$ и $n_2 = 2$.
- 27.5. $\lambda_{Л} = 9,1 \cdot 10^{-2}$ мкм; $\lambda_{П} = 1,310$ мкм.
- 27.6. 13,5 эВ.
- 27.7. $2,24 \cdot 10^{-4}$ Дж/с.
- 27.8. а) $1,9 \cdot 10^6$ м/с; б) $1,9 \cdot 10^6$ м/с.
- 27.9. $1,06 \cdot 10^9$ МГц.
- 27.10. а) $v = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$, где $n_2 \leq \sqrt{\frac{R}{R - eU}}$; $v_{2,1} = 2,5 \cdot 10^9$ МГц; $v_{3,1} = 2,9 \cdot 10^9$ МГц; $v_{3,2} = 0,46 \cdot 10^9$ МГц; б) $2,2 \cdot 10^6$ м/с.
- 27.11. а) 0,85 эВ; б) 1,51 эВ.
- 27.12. $\frac{L_2}{L_1} = 3$; $\frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{9}$; $3,7 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл, 1,4 эВ.
- 27.13. а) 3,25 м/с; б) $1,23 \cdot 10^{-2}$ Å.
- 27.14. а) $6,6 \cdot 10^{-7}$ Н; б) 54,5 В; в) ≈ 41 В.

27.15. 0,29 с.

27.16. а) 730 Å; б) 122,2 эВ; в) $v = \frac{6,56}{n} \cdot 10^6$ м/с.

27.17. а) 1,05 Å; б) 6,8 В.

27.18. а) $2,85 \cdot 10^{-13}$ м; б) 2,53 кэВ; в) ≈ 35 Å.

28.1. $\approx 6 \cdot 10^{-25}$ Å; 0,83 Å.

28.2. На 3W; 460 эВ.

28.3. $\approx 0,12$ Å.

28.4. 2,1 Å.

28.5. 2,2 Å.

28.6. 15 В.

28.7. $\lambda = \frac{hc}{\sqrt{eU(eU + 2m_0c^2)}}$; а) $3,7 \cdot 10^{-2}$ Å; б) $\approx 1,7 \cdot 10^{-6}$ Å, в) ≈ 20 кэВ.

28.8. а) 0,082 эВ; б) 382 МэВ.

28.9. а) $\approx 0,5 \cdot 10^{-10}$ м; б) $\approx 2 \cdot 10^6$ м/с; в) $\sim 2 \cdot 10^8$ м/с.

28.10. а) 15 эВ; б) 0,2 МэВ.

28.11. $\approx 6,7 \cdot 10^{-4}$ эВ.

28.12. $\approx 2,6 \cdot 10^{-8}$.

28.13. $\approx 6,7$ эВ; $\approx 5,3 \cdot 10^{-7}$ эВ.

28.14. а) $T = \frac{n^{2/3}h^2}{12\pi^2km}$; б) $\sim 4 \cdot 10^{-2}$ К; $\approx 6 \cdot 10^3$ К.

29. 1. 0,57 Å.

29.2. 2,8 Å; $\approx 6 \cdot 10^{26}$ 1/кмоль.

29.3. $\approx 1,1$ см.

29.4. $\approx 0,22^\circ$.

29.5. $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

29.6. 0,5 с.

29.7. $1,2 \cdot 10^8$ м/с.

29.8. 0,7 Å.

29.9. а) 54,4 кэВ; б) 5 кэВ.

29.10. 15 кВ.

29.11. 29 (Cu).

30.1. $\approx 10^{17}$ кг/м³; $\approx 10^{44}$ 1/м³.

30.2. ≈ 29 .

30.3. $3 \cdot 10^{-14}$ м; $3,5 \cdot 10^{15}$ кг/м³.

30.4. 65 МэВ; 17,3 МэВ.

30.5. 2,0140 а. е. м; 2,0144 а. е. м; $5,5 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.

30.6. а) 6,76 МэВ; 7,34 МэВ; б) 14,4 МэВ.

30.7. 6,4 МэВ.

30.8. 1,57 МэВ.

30.9. 10,56 МэВ.

30.10. $2,3 \cdot 10^{15}$ Дж.

31.1. $\approx 9 \cdot 10^{14}$.

31.2. $4,3 \cdot 10^{-4}$ 1/лет.

31.3. 0,7; 310 Кл.

31.4. 325 кг.

$$31.5. \omega = 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T} t\right); \quad \tau = \frac{T}{\ln 2}.$$

31.6. $\approx 63\%$.

31.7. $\approx 2,5$.

31.8. 10^{-17} кг.

31.9. $\approx 3,7 \cdot 10^{10}$ расп/(с·г); $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с; 3,32.

31.10. $4,5 \cdot 10^9$ лет; $1,24 \cdot 10^4$ расп/с.

31.11. 5,3 МэВ.

31.12. 3400 лет.

31.13. $\approx 18,9 \cdot 10^4$ расп/(с·м³).

31.14. $\approx 6 \cdot 10^{-3}$ м³.

31.15. $5,66 \cdot 10^{13}$ расп/с.

31.16. 9,1 ч.

31.17. а) $\approx 9 \cdot 10^{-8}$ мг; $\approx 10^{10}$ расп/с; б) ≈ 10 мин.

31.18. а) 0,230; б) $\approx 0,315$.

$$31.19. N_2 = \frac{m}{A} N_A \cdot \frac{T_1}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t} - e^{-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t} \right); \quad t = \frac{T_1 T_2}{(\ln 2) \cdot (T_1 - T_2)} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

31.20. $16,4 \cdot 10^3$ кг.

31.21. $1,7 \cdot 10^7$ расп/с.

31.22. а) 0,8 г; б) $10,7 \cdot 10^{16}$ расп/с.

32.1. 4,79 МэВ; 0,09 МэВ; $p_\alpha = p_{Rn} = 1,02 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с

32.2. $2,9 \cdot 10^9$ Дж; $1,59 \cdot 10^{10}$ Дж.

32.3. а) 0,04 МэВ; 0,96 МэВ; $9,2 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с; $5,6 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с; 0,36 МэВ;
0,24 МэВ; $2,77 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с; б) $m = M$; в) $x = 1,44 \cdot 10^{-14}$ м.

32.4. а) 100 МэВ; б) 9,7 ГэВ.

32.5. 224 ГэВ.

32.6. $\approx 0,83$ а. е. м.

$$32.7. \text{ а) } b = \frac{(m+M) z_1 z_2 e^2 \operatorname{tg} \theta}{8\pi \epsilon_0 M W} \approx 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м; } \text{ б) } W_\alpha = \frac{4mM}{(m+M)^2} W \cos^2 \theta = \\ = 0,04 \text{ МэВ; } \text{ в) при } \theta_0 = \arcsin \frac{m}{M} = 14,5^\circ; \text{ г) } \frac{W_1}{W} = \frac{4mM}{(m+M)^2} \cos^2 \theta = \\ = 0,16; \theta = 0 \text{ и } M = m.$$

$$32.8. Q = \left(1 - \frac{m_\alpha}{M}\right) W_\alpha - \left(1 + \frac{m_p}{M}\right) W_p + \frac{2 \cos \theta}{M} \sqrt{m_p m_\alpha W_p W_\alpha} = -1,2 \text{ МэВ.}$$

$$32.9. v = \frac{\Delta E}{h} \left(1 - \frac{\Delta E}{2mc^2}\right).$$

32.10. 1,48 эВ; 0,436 МэВ.

32.11. а) $2,1 \cdot 10^9$ Дж; б) $1,1 \cdot 10^9$ кг.

32.12. 5,7 МэВ; 17,6 МэВ.

32.13. 18,62 кэВ; 12,93 кэВ; 3,45 эВ.

32.14. а) $\approx 0,79$ МэВ; б) ≈ 214 эВ; в) 324 эВ.

32.15. 19,7 МэВ.

32.16. а) 17,3 МэВ; 8,6 МэВ; б) $\approx \frac{5}{6} \pi$.

32.17. 13,5 МэВ.

32.18. $\approx 1,85$ МэВ.

32.19. а) $E = \frac{m+M}{M} Q$; б) $-14,4$ МэВ; в) $-2,16$ МэВ; $-8,64$ МэВ.

32.20. $W_n = W_p = 0,215$ МэВ.

32.21. $h\nu_{\text{пор}} = \left(1 + \frac{|Q|}{2\mu c^2}\right) |Q|$.

32.22. ≈ 58 эВ; $\approx 0,87$ МэВ.

32.23. $6,16$ МэВ.

32.24. $8,2 \cdot 10^6$ м/с; $15,4 \cdot 10^6$ м/с.

32.25. а) 310 МэВ; б) 200 МэВ; $8 \cdot 10^{13}$ Дж; $2 \cdot 10^7$ кг.

32.26. 590 барн.

32.27. $1,93 \cdot 10^4$ барн.

32.28. 335 барн.

32.29. $\approx 3,7 \cdot 10^4$ расп/с.

32.30. а) $N = \frac{\sigma m I N_A}{A(\lambda - \sigma I)} [\exp(-\sigma I t) - \exp(-\lambda t)];$

$$\text{б) } \tau = \ln \frac{\sigma I T}{0,7} \cdot \left(\sigma I - \frac{0,7}{T}\right)^{-1}; \quad \text{в) } a_{\text{макс}} = \frac{\sigma I m N_A}{A}.$$

32.31. $\approx 1,8 \cdot 10^7$ К,

32.32. $8,5 \cdot 10^{11}$ Дж; $14,6$ МэВ; $\approx 10 Q_U$.

32.33. $1,28 \cdot 10^{10}$ Дж.

32.34. $\approx 5,5 \cdot 10^{10}$ лет; $\approx 1,75 \cdot 10^{11}$ МВт.

32.35. $0,34$ МэВ.

32.36. $\approx 2m_e v^2$; $\frac{2m_e^2 c^2}{M}$; $1,02$ МэВ; 560 эВ.

32.37. а) ≈ 292 МэВ; б) $\approx 5,65$ ГэВ.

32.38. $2,76$ МэВ.

32.39. 135 МэВ; 270 МэВ.

32.40. $52,4$ МэВ; 53 МэВ/с.

32.41. а) $26,6$ МэВ; б) 57 МэВ, под углом $12,5^\circ$ к направлению движения пиона.

32.42. $\approx 1,24$ ГэВ.

33.1. 10 .

33.2. ≈ 74 .

33.3. 2500 барн.

33.4. а) 6 м; б) $1,5$ ч.

33.5. $\approx 3,2 \cdot 10^{-14}$ кг.

33.6. $2 \cdot 10^{15}$ кг.

33.7. а) $\approx 2,2 \cdot 10^4$ $1/(m^2 \cdot c)$; б) 144 м.

33.8. $7,1 \cdot 10^7$.

33.9. $D = \frac{m W_1 N_A}{100 M A} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T}\right)\right] = 112$ рад.

33.10. $4 \cdot 10^{-3}$ $1/м$.

33.11. 19 нейтронов/ $(см^2 \cdot с)$.

33.12. ≈ 150 об/с.

33.13. $28^\circ 20'$.

33.14. 500.

33.15. $2,6 \cdot 10^{-9}$ кг.

33.16. $D = 0,54P$.

33.17. $1,6 \cdot 10^4$ мезонов/(м² · с).

33.18. $1,55 \cdot 10^8$.

33.19. 33 мР/с; ≈ 120 Р.

33.20. $4,5 \cdot 10^{-10}$ %.

33.21. 568 1/с.

33.22. 1,12 ГэВ; 180 МэВ.

33.23. $4,35 \cdot 10^4$.

33.24. $\approx 1,75 \cdot 10^7$ м/с.

33.25. $l_n = \frac{c}{2v(1+z/100\%)} \sqrt{\frac{2(W_0 + n \Delta W)}{m_0 c^2}}$; $l_1 = 0,11$ м; $l_n = 0,35$ м.

33.26. 4,35 МэВ.

33.27. 2,74 мкс.

33.28. 215 м.

33.29. 1,85 м; 13 МГц; 12%.

33.30. $v = v_0 \left(\sqrt{1 + \frac{4\pi \Delta W v_0^2 t}{ec^2 B}} \right)^{-1}$.

33.31. а) 100 Тл/с; б) 800 км; в) $5,1 \cdot 10^5$ об.

33.32. ≈ 550 эВ; 100 МэВ.

33.33. а) $\omega = \frac{c}{r} \left\{ \sqrt{1 + \frac{m_0^2}{[qrB(t)]^2}} \right\}^{-1}$; б) 0,7 Тл; ≈ 26 МГц.

33.34. 5,15 см; $\approx 5,1$ года.

33.35. 900.

33.36. а) $\approx 14,4$ МВт; б) $\approx 4,4 \cdot 10^{18}$ расп/с; в) $\approx 5,6$ кг.

33.37. 4,8 кг.

33.38. 20.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3	Часть III. Электричество . .	82
Часть I. Физические основы механики	4	§ 18. Электростатика . .	—
§ 1. Кинематика материальной точки и твердого тела	—	§ 19. Постоянный ток . .	91
§ 2. Законы Ньютона	10	§ 20. Электромагнетизм . .	103
§ 3. Закон сохранения импульса	18	§ 21. Переменный ток . .	113
§ 4. Динамика тел переменной массы	20	Часть IV. Оптика	118
§ 5. Работа, мощность, энергия	22	§ 22. Геометрическая оптика	—
§ 6. Статика	27	§ 23. Фотометрия.	129
§ 7. Динамика твердого тела	31	§ 24. Волновая оптика	132
§ 8. Всемирное тяготение	40	§ 25. Специальная теория относительности	139
§ 9. Упругие деформации	42	§ 26. Квантовые свойства излучения	142
§ 10. Колебания и волны	44	Часть V. Атомная физика	148
§ 11. Механика жидкостей	51	§ 27. Атом Резерфорда—Бора	—
Часть II. Молекулярная физика и термодинамика	58	§ 28. Волновые свойства частиц	150
§ 12. Тепловое расширение тел	—	§ 29. Рентгеновские лучи	151
§ 13. Законы идеальных газов	59	Часть VI. Ядерная физика	153
§ 14. Молекулярно-кинетическая теория газов	63	§ 30. Строение ядра	—
§ 15. Термодинамика	67	§ 31. Закон радиоактивного распада	—
§ 16. Реальные газы. Пары. Жидкости.	75	§ 32. Ядерные реакции	155
§ 17. Теплопроводность	80	§ 33. Экспериментальные методы ядерной физики	160
		Ответы	166

ИБ № 1710

Вячеслав Анатольевич Балаш

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Спецредактор В. П. Дремина.

Редактор А. И. Юдина. Переплет художника А. И. Шаварда. Рисунки художников Б. Д. Константинова, А. Ф. Сисоева. Художественный редактор В. М. Прокофьев. Технический редактор В. В. Новоселова. Корректор Р. Б. Штутман.

Сдано в набор 8/VI 1977 г. Подписано к печати 14/XI 1977 г. 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 15,46. А 03353. Тираж 95 000 экз. Зак. 2915. Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Отпечатано с готовых матриц в типографии им. Смирнова Смолблуправления издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Смоленск, пр. им. Ю. Гагарина, 2.
Цена 75 коп.