

53(075.34)

С-22

(11)

Д.И. САХАРОВ

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ФИЗИКЕ**

Д. И. САХАРОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ по ФИЗИКЕ

ИЗДАНИЕ 12-е, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено Министерством
высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов педагогических
институтов*

НБ ПНУС



354404

Москва
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
1973

В 12-м издании использованы две системы электрических единиц: СИ и симметричная нерационализированная система СГС (гауссова). Соответственно переработаны общее введение и введение к параграфам, а также таблица перевода единиц. Добавлено несколько новых задач (3-46, 4-50, 4-51, 5-19, 5-20, 8-36, 22-12, 26-26, 31-53, 41-23, 42-15, 42-16, 42-17, 42-18, 42-19, 42-20, 42-21, 42-22, 42-23). К некоторым задачам даны более подробные ответы.

А. Д. Сахаров
Г. Д. Сахаров

Сахаров Д. И.

C22 Сборник задач по физике. Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов. Изд. 12-е. М., «Просвещение», 1973.

288 с. с ил.

Сборник содержит более тысячи задач и вопросов по всем разделам курса общей физики. В каждом параграфе дан обзор понятий и соотношений, необходимых для решения задач. Все задачи снабжены ответами, а более трудные — указаниями.

С 0662-336 34-73
М103(03)-73

БИБЛИОТЕКА
ИЗДАТЕЛЬСТВА
НАУКА
ИНВ. 354404

ВНИМАНИЮ СТУДЕНТОВ

1. Прежде всего необходимо ознакомиться с таблицами, помещенными в конце книги, так как решение многих задач без пользования ими невозможно. Необходимо также знакомство с введениями, имеющимися в каждом параграфе и содержащими обзор понятий и соотношений, служащих для решения задач, помещенных в данном параграфе и в следующих за ним.

2. Вникнув в смысл задачи, следует установить, все ли данные, нужные для решения задачи, приведены; недостающие данные можно найти в таблицах, помещенных в конце книги.

3. Затем следует ясно представить себе все упрощающие предположения, которые нужно сделать, чтобы решить данную задачу.

Часть из этих упрощающих предположений указана в тексте задачи, часть должна быть непременно сформулирована при ответе, например, так: «Принимая Землю за однородный шар, находим...» и т. д.

4. Следует решать задачи в общем виде, пользуясь обозначениями величин (табл. XXXI).

5. Найдя ответ в виде некоторой формулы, выражающей искомую величину через заданные, следует проверить правильность полученной формулы следующими способами:

а) Проверить равенство размерностей у отдельных членов полученной формулы. Неравенство размерностей служит явным признаком неверности решения. Если в формулу входит показательная функция, то размерность показателя должна быть равна нулю.

б) Проверить применимость полученной формулы к частным случаям.

Рассмотрим простой пример: пусть для скорости падения на Землю тела, брошенного на высоте h со скоростью v_0 , найдена формула:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}.$$

Если $v_0 = 0$, то формула обращается в известную из теории формулу для скорости тела, падающего без начальной скорости: $v = \sqrt{2gh}$. Если высота падения очень мала, то скорость тела v , очевидно, почти равна начальной скорости, что также получается из приведенной формулы, если положить $h = 0$.

Второй пример. Из условий задачи 27-14 ясно, что при $U_2 = U_1$ приведенная в ответе формула должна дать $t_2 = t_1$, а при $U_2 = U_2$ должно получиться $t_2 = t_2$. Если, решая задачу 27-14, мы получили бы формулу, которая не удовлетворяла бы указанным требованиям, то это означало бы, что в наши вычисления вкралась ошибка.

в) Иногда из условий видно, что формула, выражающая ответ, должна быть симметричной по отношению к данным задачи, т. е. ответ не должен меняться, если поменять данные местами.

Рассмотрим пример. Гальванический элемент при сопротивлении внешней цепи, равном $R_1 = 0,2$ ом, дает ток $I_1 = 2$ а, а при сопротивлении внешней цепи, равном $R_2 = 1,5$ ом, дает ток $I_2 = 0,7$ а. Какова электродвижущая сила элемента? Очевидно, что последовательность опытов, обозначенных индексами 1 и 2, произвольна и ее можно заменить на обратную. Действительно, решая задачу, находим формулу, выражающую э.д.с. элемента как функцию I_1 , I_2 , R_1 и R_2 :

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

Эта формула симметрична относительно величин, обозначенных индексами 1 и 2, и если всюду, где стоит индекс 1, поставить индекс 2, и наоборот,

формула не изменится. Предположим, что кто-нибудь, решая эту или другую задачу, в которой по смыслу условий можно менять последовательность данных, получил формулу, в которой нельзя менять местами индексы. Такой результат служил бы признаком, что в решение задачи вкралась ошибка.

6. Необходимо иметь в виду, что решение задачи должно быть обосновано. Так, например, при решении задачи 8-7 надо показать, почему в рассматриваемом случае можно применить формулу для математического маятника, хотя вместо математической точки колеблется целое полено.

Точно так же требуется обоснование ответов на качественные вопросы. Например, полный ответ на вопрос 32-5, б должен быть примерно таков. Рассмотрим работу ΔA при столь малом продвижении магнита, что ток I в течение его можно считать постоянным. Так как за счет этой работы выделяется некоторое количество теплоты, то можно написать: $\Delta A = I^2 R \Delta t = \Delta q R$. Так как Δq при определенном изменении магнитного потока не зависит от скорости этого изменения, то ΔA пропорционально I . При быстром вдвигании магнита I , а следовательно, и ΔA больше, чем при медленном. Это справедливо для любого малого участка движения магнита. Следовательно, и общая работа при быстром движении магнита больше, чем при медленном.

7. Прежде чем приступить к числовым расчетам, следует произвести пересчет всех имеющихся данных преимущественно в международную систему единиц СИ.

В пересчете нет необходимости, если ответ зависит от отношения величин одинаковой размерности. Например, в расчеты, связанные с уравнением состояния идеального газа, часто входят отношения вида $\frac{p_1}{p_2}$, $\frac{T_1}{T_2}$ или $\frac{V_1}{V_2}$. В этих выражениях давление p , абсолютную температуру T , объем V можно выражать в любых единицах.

При решении задач по электричеству и магнетизму рекомендуется пользоваться или системой СИ, или симметричной системой СГС (гауссова система единиц). Формулы для этих двух систем единиц несколько различны (поскольку первая система является рационализированной, а вторая нет; кроме того, в некоторых формулах симметричной системы присутствует множитель $\frac{1}{c}$, где c — скорость света). В начале каждого из параграфов, посвященных задачам по электричеству и магнетизму, приведены формулы обеих систем. При этом диэлектрическая проницаемость в системе СГС обозначена ϵ , а в системе СИ — ϵ' :

$$\epsilon' = \epsilon_0 \epsilon,$$

где $\epsilon_0' = 8,84 \cdot 10^{-12} \frac{\phi}{\text{м}}$ (электрическая постоянная в системе СИ),

Аналогично для магнитной проницаемости:

$$\mu' = \mu_0 \mu,$$

где $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{гн}}{\text{м}}$.

В вакууме $\epsilon = 1$ и $\mu = 1$, т. е. в системе СГС в вакууме $E = D$ и $B = H$. При пересчете данных удобно пользоваться таблицами II-4 и II-5.

8. Приступая к вычислениям, надо, приняв во внимание степень точности данных задач, определить число знаков, которые следует вычислить в результате (в большинстве задач два или три знака). При расчетах надо пользоваться счетной линейкой или логарифмическими таблицами.

9. Легкие задачи отмечены значком \circ , задачи средней трудности — значком Δ , более трудные — значком \square .

Значками \square и Δ отмечены также задачи, требующие применения формул интегрального и дифференциального исчисления.

§ 1. Кинематика

1) Смещение точки (s) есть расстояние между конечным и начальным положениями точки.

2) Скорость точки

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt},$$

ускорение

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

3) Скорость (v) и смещение (s) точки, соответствующие отрезку времени (t) при равномерном переменном движении по прямой линии, связаны следующими соотношениями:

$$v = v_0 + at; \quad s = v_0 t + \frac{at^2}{2}; \quad v^2 - v_0^2 = 2as,$$

где v_0 — начальная скорость. При $a = 0$ получается уравнение равномерного движения: $s = vt$.

4) Равномерно ускоренное и равномерно замедленное движение рассматривают по одним и тем же формулам, знаки величин a , v , s могут быть любыми, но выбираются согласованно.

5) Если из некоторой точки проводить векторы скорости движущейся точки в различные моменты движения, то концы этих векторов расположатся по кривой, называемой **годографом скорости**. При движении точки по траектории конец вектора скорости движется по годографу, причем скорость движения конца вектора скорости по годографу равна ускорению точки при движении по траектории.

6) При криволинейном движении

$$a_n = \frac{v^2}{R}; \quad a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2},$$

где a_t — тангенциальное ускорение; a_n — нормальное (центростремительное) ускорение; a — полное ускорение.

7) Простое гармоническое колебание определяется уравнениями:

$$s = A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right);$$

$$v = A\omega \cos(\omega t + \varphi);$$

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s,$$

где A — наибольшее расстояние колеблющейся точки от среднего положения; T — период колебания и φ — начальная фаза.

8) При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми периодами получается гармоническое колебание с амплитудой

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

9) Скорость сложного движения определяется по правилу параллелограмма.

10) При поступательном движении твердого тела скорости и ускорения всех точек тела в любой момент одинаковы.

11) Вращательное движение твердого тела характеризуется угловой скоростью $\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}$ и угловым ускорением

$\epsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$. Угловая скорость и угловое ускорение — векторы и складываются по правилу параллелограмма.

12) Связь тангенциальных скорости и ускорения точки вращающегося тела с угловыми:

$$v = \omega R = \frac{2\pi R}{T}; \quad a = \epsilon R,$$

где R — расстояние данной точки до оси; T — период вращения.

○ 1-1. На рисунке 1-1 показан график зависимости смещения от времени для движения вагона трамвая в начале перегона.

а) Каково движение вагона в различные моменты времени?

б) В какой момент скорость вагона наибольшая?

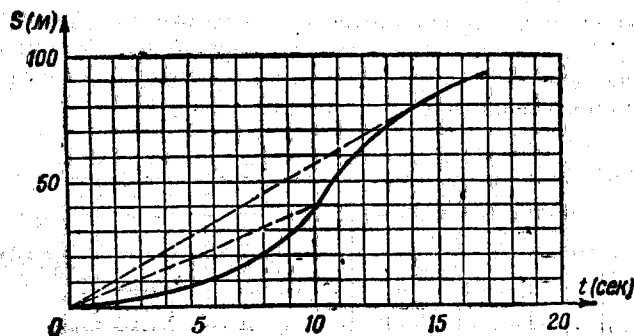


Рис. 1-1.

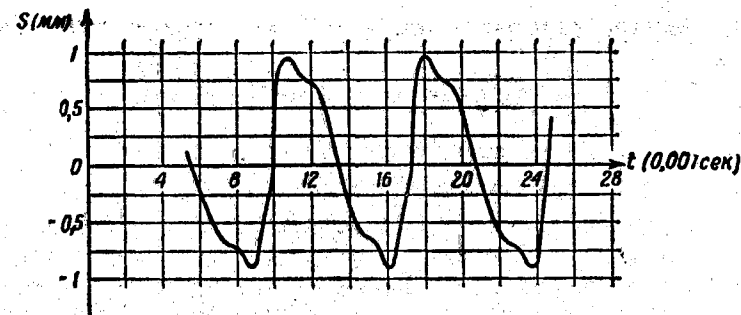


Рис. 1-2.

в) Что показывают пунктирные линии?

г) Какова средняя скорость за первые 10 сек? за первые 17 сек?

○ 1-2. На рисунке 1-2 показан примерный график движения некоторой точки звучащей струны рояля. В какие моменты точка движется с наибольшей скоростью и в какие с наибольшим ускорением?

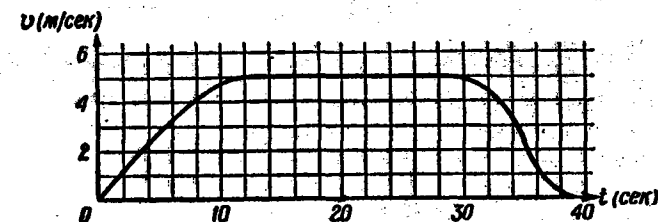


Рис. 1-3.

○ 1-3. На рисунке 1-3 показан примерный график скорости автомобиля.

а) Каково движение автомобиля в различные моменты времени?

б) Каков путь, пройденный автомобилем за 40 сек?

○ 1-4. Существуют приборы, позволяющие записывать графики, показывающие, как с течением времени меняется ускорение движущегося вагона.

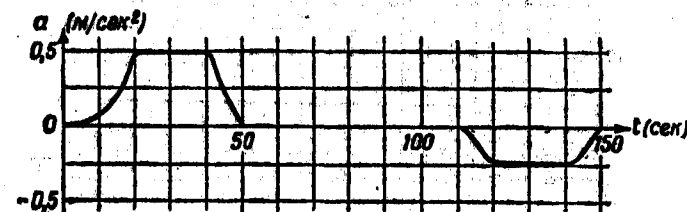


Рис. 1-4.

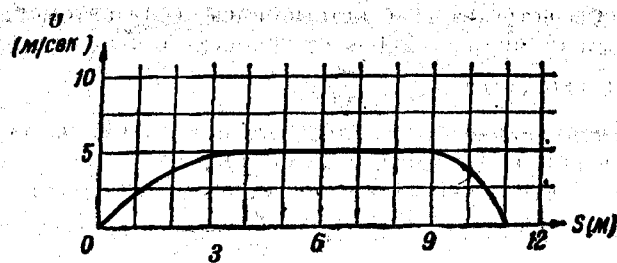


Рис. 1-5.

а) В какие отрезки времени движение вагона, описанное графиком, показанным на рисунке 1-4, было ускоренным, в какие — замедленным, в какие — равномерным?

б) Начертить приблизительно график скорости, соответствующий графику 1-4, предполагая, что при $t=0$, $v=0$.

○ 1-5. На рисунке 1-5 дан график зависимости скорости от пройденного пути. Каков характер движения на отдельных участках пути?

□ 1-6. На рисунке 1-6 показан график зависимости ускорения вагона от пройденного пути.

а) Каков характер движения на отдельных участках?

б) Что показывает площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс?

в) Что можно сказать о начальной и конечной скоростях вагона, если площади A и B на графике равны?

○ 1-7. Поезд идет со скоростью $75 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Может ли человек заметить его перемещение темной ночью при вспышке молнии, продолжительность которой $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ сек, если он находится на таком расстоянии от поезда, на котором он может заметить смещение не меньше 1 см?

△ 1-8. а) Человек находится на расстоянии $h=50$ м от прямой дороги, по которой приближается автомобиль со скоростью $v_1=10 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. По какому направлению должен бежать че-

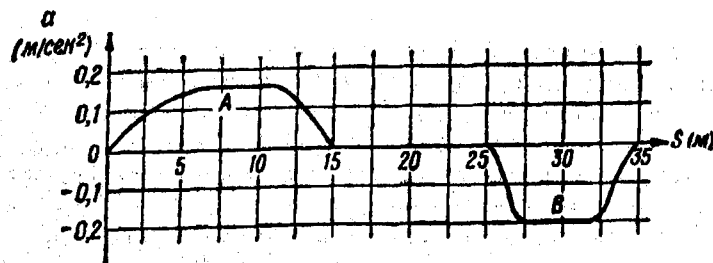


Рис. 1-6.

ловек, чтобы встретиться с автомобилем, если автомобиль находится на расстоянии $b=200$ м от человека и если человек может бежать со скоростью $v_2=3 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

б) Какова наименьшая скорость, с которой должен бежать человек, чтобы встретиться с автомобилем?

○ 1-9. Поезд, двигаясь от остановки, прошел в течение 50 сек 200 м и достиг скорости $6 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Увеличивалось или уменьшалось ускорение движения с течением времени?

○ 1-10. Поезд метро проходит перегон 2 км за 2 мин 20 сек. Принимая, что максимальная скорость поезда равна $60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ и что в начале и в конце перегона поезд движется с постоянными ускорениями, равными по абсолютной величине, определить эти ускорения.

△ 1-11. Наблюдатель, стоявший в момент начала движения электропоезда у его переднего края, заметил, что первый вагон прошел мимо него за $\tau=4$ сек. Сколько времени будет двигаться мимо него n -й (7-й) вагон? Движение считать равномерно ускоренным.

△ 1-12. Наблюдатель, стоящий на платформе, заметил, что первый вагон электропоезда, приближающегося к станции, прошел мимо него в течение 4 сек, а второй — в течение 5 сек. После этого передний край поезда остановился на расстоянии 75 м от наблюдателя. Считая движение поезда равномерно замедленным, определить его ускорение.

○ 1-13. По наклонной доске пустили снизу вверх шарик. На расстоянии 30 см от начала пути шарик побывал дважды: через 1 сек и через 2 сек после начала движения. Определить начальную скорость и ускорение движения шарика, считая его постоянным.

□ 1-14. Фонарь, находящийся на расстоянии $R_0=3$ м от вертикальной стены, бросает на нее зайчик. Фонарь равномерно вращается около вертикальной оси. Частота оборотов фонаря $n=0,5 \text{ сек}^{-1}$. При вращении фонаря зайчик бежит по стене по горизонтальной прямой. Найти скорость зайчика через $t=0,1$ сек после того, как луч света был перпендикулярен к стене.

○ 1-15. С пристани A вверх и вниз по реке отправляются два одинаковых катера и прибывают к пристаням B и C через одинаковые отрезки времени. Обратное возвращение катера из B в A требует в 1,5 раза больше времени, чем возвращение второго катера из C в A . Во сколько раз скорость катера в стоячей воде больше скорости течения реки?

△ 1-16. Две прямые линейки лежат одна на другой (рис. 1-7). Края линейек образуют угол α . Если линейку B перемещать поступательно со скоростью v , вектор которой образует

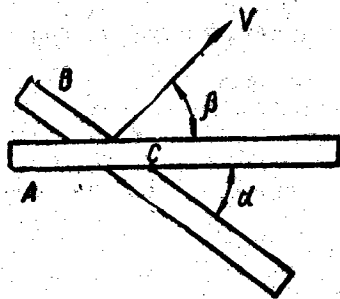


Рис. 1-7.

с краем линейки A угол β , то точка пересечения линеек (точка C) перемещается. Определить скорость v_c точки C как функцию скорости v и углов α и β . При каком угле β скорость v_c наиболее велика? При каком угле β скорости v_c и v равны между собой?

△ 1-17. С какой скоростью должен лететь и какой курс должен держать самолет, чтобы за время 1 ч пролететь точно по направлению на север путь 200 км, если во

время полета дует северо-восточный ветер под углом 35° к меридиану со скоростью $30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$?

△ 1-18. Два острова A и B лежат посередине реки на расстоянии $s=0,5 \text{ км}$ один от другого по направлению течения, скорость которого $v_1=2,5 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. На берегу против A по направлению, перпендикулярному к направлению течения, находится пристань, расстояние которой от A тоже равно $s=0,5 \text{ км}$. Гребец едет на лодке один раз с острова A на остров B и обратно, другой раз — с острова A к пристани и обратно. Скорость лодки в стоячей воде равна v_2 .

а) При каком условии гребец может совершить первую поездку?

б) При каком условии он может переехать с острова на пристань по соединяющей их прямой?

в) Как в предыдущем случае он должен держать свой курс, если $v_2=5 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$?

г) Одинаковое ли время понадобится ему для этих двух поездок?

д) При какой скорости v_2 первая из этих поездок потребует времени в $n=2$ раза больше, чем вторая?

○ 1-19. Какой вид имеет годограф скорости для следующих случаев: равномерное прямолинейное движение? равномерно ускоренное прямолинейное движение? равномерное движение по окружности? равномерно ускоренное движение по окружности?

✓ ○ 1-20. Поезд движется по закруглению с радиусом 400 м, причем его ускорение (тангенциальное) равно $0,2 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$. Определить его нормальное и полное ускорение в тот момент, когда его скорость равна $10 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

△ 1-21. Три самолета выполняют разворот, двигаясь на расстоянии 60 м друг от друга (рис. 1-8). Средний самолет ле-

тит со скоростью $360 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, двигаясь по дуге окружности радиусом 600 м. Определить ускорение каждого самолета.

○ 1-22. Колесо, имеющее 12 равноотстоящих спиц, во время вращения фотографируют с экспозицией 0,04 сек. На снимке видно, что каждая спица за это время повернулась на половину угла между двумя соседними спицами. Найти угловую скорость вращения.

△ 1-23. а) Круг (рис. 1-9) с черным сектором (угол при центре равен 40°) вращается вокруг оси, проходящей через центр круга перпендикулярно к его плоскости, с частотой оборотов 1500 мин^{-1} . Что будет видно на круге, если в темной комнате его освещать светом, мигающим 100 раз в секунду, причем длительность каждой вспышки света равна 0,003 сек (неоновая лампа, работающая на переменном токе)? Принять во внимание, что поверхность, освещаемая светом, мигающим чаще, чем 10 раз в секунду, кажется тем более яркой, чем длительнее промежутки времени, в течение которых она освещается.

б) Решить эту задачу при частоте оборотов 1470 мин^{-1} .

○ 1-24. Каково направление углового ускорения в следующих случаях: а) тело вращается около вертикальной оси по стрелке часов с возрастающей угловой скоростью? б) ось вращения тела поворачивается, но величина угловой скорости остается неизменной?

○ 1-25. Колесо, вращающееся с частотой оборотов 1500 мин^{-1} , при торможении стало вращаться равномерно замедленно и остановилось через 30 сек. Найти угловое ускорение и число оборотов с момента начала торможения до остановки.

✓ ○ 1-26. Некоторое тело начинает вращаться с постоянным угловым ускорением $0,04 \text{ сек}^{-2}$. Через сколько времени после начала вращения полное ускорение какой-либо точки тела будет направлено под углом 76° к направлению скорости этой точки?

△ 1-27. Шарик радиусом 3 см катится равномерно и без скольжения по двум параллельным линейкам, расстояние между которыми равно 4 см (рис. 1-10), и за 2 сек проходит 120 см. С какими скоростями движутся верхняя и нижняя точки шарика?

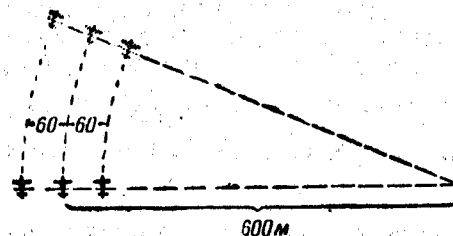


Рис. 1-8.

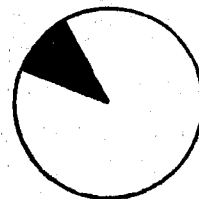


Рис. 1-9.



Рис. 1-10.

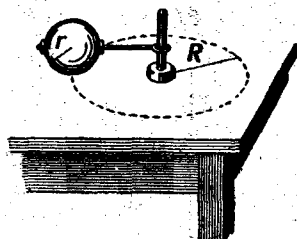


Рис. 1-11.

1-28. Шар радиусом 16 см насажен на горизонтальную ось и катится по плоской поверхности со скоростью $60 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, описывая окружность радиусом 30 см (рис. 1-11). Определить полную угловую скорость шара и ее наклон к горизонту.

1-29. Наибольшее смещение и наибольшая скорость точки, совершающей гармоническое колебание, равны соответственно 5 см и $12 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. а) Каково наибольшее ускорение? б) Каковы скорость и ускорение точки в тот момент, когда смещение равно 3 см?

1-30. Конеч ветви камертона колеблется с частотой 500 гц и амплитудой 0,2 мм. Определить: а) среднюю скорость при движении от крайнего положения к положению равновесия; б) среднюю скорость при прохождении 0,1 мм, начиная от крайнего положения; в) среднюю скорость при прохождении 0,1 мм, начиная от положения равновесия; г) максимальную скорость.

1-31. Середина струны колеблется с частотой 200 гц и с амплитудой 3 мм. Найти наибольшее ускорение.

1-32. Во многих машинах (компрессор, водяной насос и т. п.) встречается механизм, схематически изображенный на рисунке 1-12. При каком условии движение точки А можно считать гармоническим колебанием, если точка В равномерно движется по окружности?

1-33. Балансир карманных часов совершает вращательные гармонические колебания. Как движется при этих колебаниях конец вектора угловой скорости балансира?

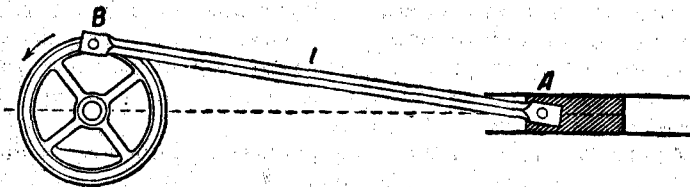


Рис. 1-12.

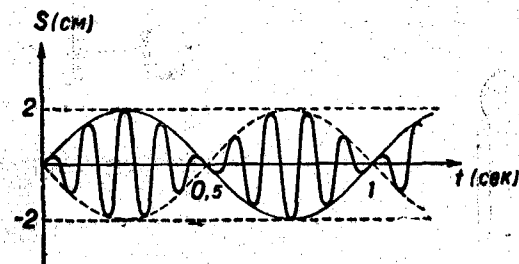


Рис. 1-13.

1-34. а) Два одинаково направленных гармонических колебания одного периода с амплитудами 5 и 7 см складываются в одно гармоническое колебание с амплитудой 9 см. Определить разность фаз складываемых колебаний.

б) Наибольшая скорость первого колебания равна $50 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

Определить наибольшую скорость результирующего колебания.

1-35. Начертить график движения, которое является результатом сложения двух гармонических колебаний с периодами 0,02 и 0,03 сек. Амплитуда первого колебания в два раза больше амплитуды второго. Принять, что в начальный момент фазы колебаний равны 0 и π . Определить период получившегося таким образом негармонического колебания.

1-36. В помещении установлены два электродвигателя. Когда работает один из двигателей, некоторая точка пола совершает колебания с амплитудой 0,1 мм и с частотой 1410 мин^{-1} . Когда работает другой двигатель, та же точка пола совершает колебания с той же амплитудой и с частотой 1440 мин^{-1} . Как будет колебаться эта точка, если оба двигателя будут работать одновременно?

1-37. На рисунке 1-13 дан график сложного колебания. Известно, что оно состоит из двух синусоидальных колебаний. Найти их частоты и амплитуды.

§ 2. Движение свободно падающих и брошенных тел

Задачи настоящего параграфа относятся к движению тел с ускорением, постоянным и по величине, и по направлению. Примером такого движения можно считать движение тел в поле тяготения Земли на небольшом расстоянии от ее поверхности при условии, что сила сопротивления среды (воздуха) значительно меньше силы тяжести тела. При решении задач следует принимать, что эти условия выполнены.

1) Кроме случаев, особо оговоренных, ускорение падающих тел следует считать равным $g = 9,80 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

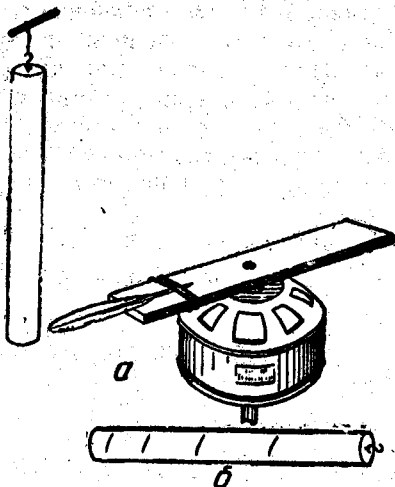


Рис. 2-1.



Рис. 2-2.

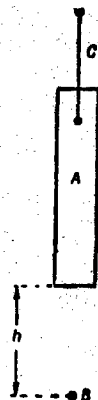


Рис. 2-3.

2) Наибольшая высота и дальность полета тел, брошенных под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0 , равны

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \text{ и } s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

2-1. С какой высоты в безвоздушном пространстве должно упасть тело, чтобы приобрести скорость: а) $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ (скорость поезда)? б) $1 \frac{\text{см}}{\text{мин}}$ (скорость оседания очень мелкой пыли в воздухе)?

2-2. На рисунке 2-1, а изображена простая установка для определения ускорения падающих тел в школьной лаборатории. Мимо смоченной краской кисточки (или птичьего пера), вращаемой электродвигателем, падает после пережигания нити цилиндр, обернутый бумагой. Кисточка наносит на цилиндр метки, как показано на рисунке 2-1, б.

а) Почему метки наклонены к оси цилиндра?

б) Определить ускорение g , если расстояния между метками оказались равными 23, 40, 56, 74, 91, 110, 126 и 143 мм. Измерения показали, что число оборотов двигателя равно 1440 мин^{-1} .

2-3. На рисунке 2-2 показана в натуральную величину кривая линия, вычерченная острием, прикрепленным к ветви звучащего камертона, на свободно падающей мимо него закованной стеклянной пластинке. Определить частоту камертона.

2-4. Камень брошен вертикально вверх со скоростью $v_0 = 15 \text{ м/сек}$. Через сколько времени он будет на высоте: а) $h_1 = 10 \text{ м}$? б) $h_2 = 12 \text{ м}$?

2-5. Линейка А (рис. 2-3) длиной 25 см подвешена к стене на нити. Ниже линейки в стене имеется маленькое отверстие В. На какой высоте h над отверстием В должен находиться нижний край линейки, если нужно, чтобы линейка, падая при пережигании нити, закрыла собой отверстие В на 0,1 сек?

2-6. С какой скоростью нужно бросить вертикально тело с высоты 40 м, чтобы оно упало: а) на 1 сек раньше, чем в случае свободного падения? б) на 1 сек позднее?

2-7. Два тела брошены вертикально вверх из одной и той же точки с одной и той же начальной скоростью $v_0 = 24,5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ с промежутком времени $\tau = 0,5 \text{ сек}$.

а) Через сколько времени от момента бросания второго тела и на какой высоте h они столкнутся?

б) Каков физический смысл решения, если $\tau \geq \frac{2v_0}{g}$?

2-8. Показать, что вектор смещения s тела, брошенного со скоростью v_0 , через отрезок времени t равен векторной сумме:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{g t^2}{2}.$$

2-9. Камень, брошенный горизонтально на высоте $h = 2 \text{ м}$ над землей, упал на расстоянии $s = 7 \text{ м}$ от места бросания (считая по горизонтали). Найти его начальную и конечную скорости (v_0 и v).

2-10. На рисунке 2-4 изображен школьный опыт, служащий для иллюстрации второго закона движения. Из каплиницы А, установленной на движущейся тележке В, через равные промежутки времени падают капли. Следы капель ССС... отстоят друг от друга на расстояниях, составляющих арифметическую прогрессию. Это принимается за доказательство того, что тележка движется равномерно ускоренно. Проверить, приняв во внимание, что капли падают по параболическим траекториям, правильно ли это.

2-11. Начальная скорость брошенного камня равна $10 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, а спустя 0,5 сек скорость камня равна $7 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. На какую высоту над начальным уровнем поднимется камень?

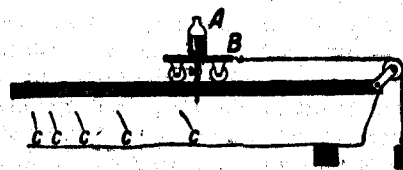


Рис. 2-4.

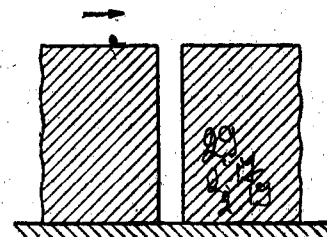


Рис. 2-5.

✓ □ 2-12. Две стальные плиты высотой 40 см помещены рядом и образуют вертикальную щель шириной 2 см (рис. 2-5).

К щели подкатывается стальной шарик со скоростью $1 \frac{м}{сек}$ и проваливается в нее, несколько раз ударяется о стенки щели и падает на пол. Направление движения шарика перед падением в щель перпендикулярно к щели. Диаметр шарика равен 0,6 см. Сколько раз шарик ударится о стенки перед тем, как упасть на пол? (Принять, что шарик отражается от плиты с той же скоростью, с которой ударился, и что угол отражения равен углу падения. Временем удара шарика о стенку пренебречь.)

○ 2-13. Под каким углом к горизонту надо бросить тело, чтобы высота подъема была равна дальности полета?

○ 2-14. а) Во время спортивных состязаний бросили диск на расстояние 53,1 м. С какой минимальной скоростью надо бросить диск, чтобы он пролетел это расстояние, если $g = 9,81 \frac{м}{сек^2}$?

Сопротивлением воздуха можно пренебречь. Принять, что места бросания и падения диска находятся на одной высоте.

б) Что получилось бы при такой же скорости и том же угле бросания на экваторе, где $g = 9,78 \frac{м}{сек^2}$?

в) Какие данные следовало бы добавить к числам, характеризующим рекорды метания диска, чтобы можно было определить начальные скорости диска, которые собственно и характеризуют спортсменов?

○ 2-15. Из брандспойта бьет струя под углом $\alpha = 32^\circ$ к горизонту; струя падает на расстоянии $s = 12$ м от брандспойта. Площадь отверстия брандспойта равна $S = 1$ см². Сколько воды подает брандспойт за $t = 1$ мин?

○ 2-16. Какой вид имеет годограф скорости для наклонно брошенного тела?

Δ 2-17. Тело брошено под углом $\alpha_0 = 60^\circ$ к горизонту со скоростью $v_0 = 20 \frac{м}{сек}$.

а) Под каким углом α к горизонту движется тело через 1,5 сек после начала движения? через 2,5 сек?

б) Через сколько времени и на какой высоте тело будет двигаться под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту?

✓ □ 2-18. Два тела брошены под разными углами к горизонту и с различными скоростями. Показать, что во время движения их относительная скорость постоянна по величине и направлению.

Δ 2-19. При каких углах между начальной скоростью и горизонтом брошенный камень при навесной траектории достигнет цели через промежуток времени в n раз ($n = 2$) больший, чем при настильной с той же начальной скоростью?

□ 2-20. Камень брошен с высоты $h = 2,1$ м над поверхностью Земли под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту и упал на Землю

на расстоянии $s = 42$ м от места бросания, считая по горизонтали. С какой скоростью камень был брошен, сколько времени летел и на какой наибольшей высоте был?

□ 2-21. Упругий шарик падает на наклонно поставленную стенку, пролетев высоту $h = 20$ см. На каком расстоянии от места падения он второй раз ударится о стенку? Угол наклона стенки к горизонту $\alpha = 37^\circ$.

Δ 2-22. Камень брошен со скоростью $v_0 = 20 \frac{м}{сек}$ под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Определить радиус кривизны R его траектории: а) в верхней точке; б) в момент падения на Землю.

§ 3. Законы движения. Работа, мощность, энергия

1) Если в условиях рассматриваемой задачи скорости v и ускорения a всех точек тела в определенный момент мало отличаются друг от друга, то движение тела можно рассчитывать как движение точки (точечное тело).

2) Ускорение, с которым движется точечное тело, равно

$$a = \frac{F}{m},$$

где F — векторная сумма всех сил, действующих на тело, m — масса тела.

3) Изменение количества движения тела (импульса тела) равно $\Delta K = \Delta(mv) = F \cdot \Delta t$, где Δt — отрезок времени, в течение которого действовала сила.

4) Центром инерции системы точечных тел (движущихся независимо или составляющих сплошное тело) называется точка, координаты которой определяются формулами:

$$x_0 = \frac{\sum mx}{\sum m}; \quad y_0 = \frac{\sum my}{\sum m}; \quad z_0 = \frac{\sum mz}{\sum m},$$

где x_0, y_0, z_0 — координаты центра инерции; m, x, y, z — массы и координаты тел, составляющих систему. Теми же формулами определяется положение центра тяжести системы, когда она находится в однородном поле тяготения (поле тяготения Земли на небольшом по сравнению с ее радиусом протяжении можно считать однородным).

5) В замкнутой системе тел постоянны по величине и направлению: а) векторная сумма импульсов составляющих ее тел; б) скорость центра инерции системы.

6) В незамкнутой системе тел ускорение центра инерции a определяется по формуле

$$a = \frac{F}{m},$$

где F есть векторная сумма всех сил, действующих на точки системы, m — сумма их масс.

7) При относительном движении соприкасающихся тел сила трения равна $f = \mu N$ (N — сила нормального давления тел друг на друга, μ — коэффициент трения). При решении задач следует принимать μ не зависящим от скорости.

8) Работа A силы F при смещении s равна

$$A = Fs \cos(\alpha),$$

9) Мощность

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = Fv,$$

где ΔA — работа, произведенная в течение отрезка времени Δt .

10) Кинетическая энергия тела

$$E = \frac{mv^2}{2}.$$

11) Потенциальная энергия системы груз — Земля

$$П = mgh,$$

где h — высота центра тяжести тела над уровнем, принимаемым за нулевой.

12) В замкнутой системе полная энергия постоянна. В незамкнутой системе изменение энергии равно работе внешних сил.

13) В задачах настоящего параграфа подразумевается, что движение тел и до и после взаимодействия (например, до и после удара) является поступательным.

О 3-1. а) Пуля массой $m = 10$ г, двигавшаяся со скоростью $v = 200 \frac{м}{сек}$, врезалась в доску и углубилась в нее на расстояние $l = 4$ см. Определить среднюю силу сопротивления F доски и время t движения пули в доске, считая движение пули внутри доски равномерно замедленным.

б) Что произойдет, если произвести выстрел в доску такого же материала, но толщиной 2 см? Какое количество движения получит доска?

О 3-2. Автомобиль-тягач, имеющий тормоза на всех колесах, тянет прицеп со скоростью $30 \frac{км}{ч}$. Масса автомобиля 5000 кг, масса прицепа 2000 кг. На каком наименьшем пути можно затормозить этот автопоезд до полной остановки при следующих данных: коэффициент статического трения шин о покрытие дороги равен 0,6, коэффициент силы тяги для тягача и для прицепа равен 0,03? Сопротивлением воздуха можно пренебречь.

Указание. Коэффициентом силы тяги называется отношение силы сопротивления, возникающего при качении любого экипажа, к его весу. Сила сопротивления вызвана трением в подшипниках и приложена к экипажу в точках соприкосновения колес с землей.

О 3-3. Груз, масса которого равна 1 кг, подвешенный на динамометре, поднимается сначала ускоренно, затем равномерно и,

наконец, замедленно, после чего он таким же образом опускается. Абсолютная величина ускорения во всех случаях постоянна и равна $0,5 \frac{м}{сек^2}$. Что показывает динамометр в различные моменты движения?

Δ 3-4. Через блок ничтожной массы, вращающийся с малым трением, перекинута нить, на концах которой привязаны грузы m_1 и m_2 , причем m_2 в n раз ($n=2$) больше m_1 . Груз m_2 поднимают настолько, чтобы груз m_1 коснулся пола (рис. 3-1), и отпускают. На какую высоту поднимется груз m_1 , после того как груз m_2 ударится о пол, если высота груза была равна $h_2 = 30$ см?

Δ 3-5. Человек жестко связан с резиновым шаром, наполненным водородом. Масса человека вместе с массой шара с водородом в n раз ($n=1,1$) больше массы вытесняемого ими воздуха. Пренебрегая сопротивлением воздуха и принимая, что при движении шара в воздухе эффективная масса увеличивается на величину массы вытесненного воздуха, вычислить:

а) с каким ускорением падает человек с шаром;

б) на какую высоту поднимется человек, если прыгнет вместе с шаром вертикально вверх с такой скоростью, при которой без шара поднялся бы на 20 см.

Δ 3-6. Доска A движется по горизонтальному столу под действием силы натяжения привязанной к ней нити. Нить перекинута через прикрепленный к столу блок и прикреплена к другой доске B , падающей вниз (рис. 3-2).

а) Определить натяжение нити F , если масса доски A $m_1 = 200$ г, масса доски B $m_2 = 300$ г, коэффициент трения $\mu = 0,25$. Масса блока ничтожно мала.

б) Как изменится ответ, если доски поменять местами?

в) Определить силу, действующую на ось блока в случаях а) и б).

□ 3-7. Для иллюстрации второго закона движения иногда показывают такой опыт (рис. 3-3). Тележка m_2 приводится в движение вначале грузом m_1 , а затем грузом в n раз ($n=2$) большим.

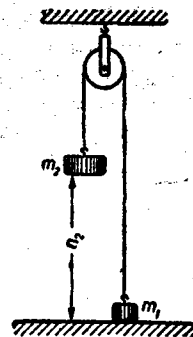


Рис. 3-1.



Рис. 3-2.

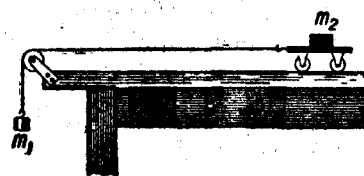


Рис. 3-3.

а) Можно ли утверждать, что при отсутствии трения ускорение во втором случае должно быть в n раз больше, чем в первом?

б) Каково отношение ускорений, если масса груза $m_1 = 30$ г, масса тележки $m_2 = 200$ г и коэффициент трения $\mu = 0,1$?

в) При каком коэффициенте трения ускорение во втором случае в n раз больше, чем в первом?

Δ 3-8. Определить ускорение, с которым движется груз m_1 в установке, изображенной на рисунке 3-4.

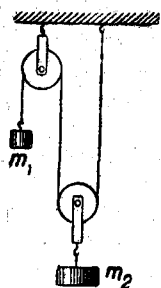


Рис. 3-4.



Рис. 3-5.

Трением, массами блоков и жесткостью шнура пренебречь. Рассмотреть следующие частные случаи:

а) $m_1 = m_2$; в) $2m_1 = m_2$;

б) $m_1 \ll m_2$; г) $m_1 \gg m_2$.

○ 3-9. Санки скатываются с ледяной горы высотой h и останавливаются на ледяном поле на расстоянии s по горизонтальному направлению от вершины наклонной плоскости (рис. 3-5). Показать, что коэффициент трения $\mu = \frac{h}{s}$.

○ 3-10. Тело медленно втаскивают из точки B (рис. 3-6) в точку A по плоской кривой. Показать, что работа подъема не зависит от формы пути, если коэффициент трения во всех точках пути один и тот же.

Δ 3-11. Несколько наклонных плоскостей имеют общее основание (рис. 3-7).

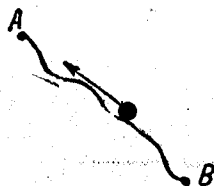


Рис. 3-6.

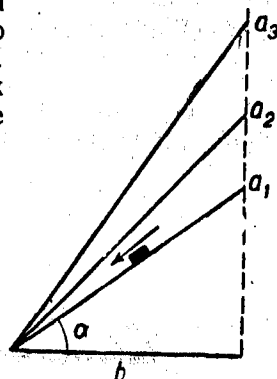


Рис. 3-7.

а) Каков наклон плоскости к горизонту, если время соскальзывания тел по этой плоскости меньше, чем по остальным плоскостям? (Рассмотреть случаи, когда трение ничтожно мало и когда коэффициент трения $\mu = 0,25$.)

б) Каков коэффициент трения, если время соскальзывания при наклоне $\alpha_1 = 60^\circ$ и время соскальзывания при наклоне $\alpha_2 = 45^\circ$ равны между собой?

Δ 3-12. Ледяная гора составляет с горизонтом угол $\alpha = 10^\circ$. По ней пускают снизу вверх камень, который, поднявшись на некоторую высоту, затем соскальзывает по тому же пути вниз. Каков коэффициент трения, если время спуска камня в n раз ($n = 2$) больше времени подъема?

□ 3-13. По наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом, скользит доска, на которой находится брусок. Определить ускорение доски a_1 и ускорение бруска a_2 , если коэффициенты трения доски о наклонную плоскость и бруска о доску равны μ_1 и μ_2 . Разобрать следующие случаи:

а) $\operatorname{tg} \alpha > \mu_1 = \mu_2$; б) $\operatorname{tg} \alpha > \mu_1 > \mu_2$; в) $\operatorname{tg} \alpha > \mu_2 > \mu_1$;

г) $\mu_2 > \operatorname{tg} \alpha > \mu_1$; д) $\mu_1 > \operatorname{tg} \alpha > \mu_2$.

○ 3-14. Стальной шарик падает на горизонтальную поверхность стола с высоты 25,6 см и, отскочив, поднимается на высоту 19,6 см. Масса шарика 10 г. Какова средняя сила, с которой шарик действовал на стол при ударе, если соприкосновение шарика со столом длилось $1 \cdot 10^{-4}$ сек?

○ 3-15. Некоторые животные, живущие в воде (например, каракатица), передвигаются следующим образом. Внутри тела животного имеется полость, сообщающаяся с окружающей водой. Животное то увеличивает объем полости (при этом вода входит в полость), то уменьшает ее объем и выбрасывает воду наружу. Что происходит при этих процессах?

○ 3-16. Когда колеблется струна, скорость ее все время меняется. Количество движения струны вследствие этого тоже меняется. Как это согласовать с законом сохранения количества движения?

Δ 3-17. На рисунке 3-8 изображен школьный опыт, иллюстрирующий третий закон движения. Между двумя тележками

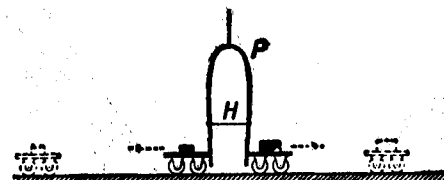


Рис. 3-8.

помещается легкая сжатая пружина P . При пережигании нити H пружина расталкивает тележки в разные стороны. Как относятся расстояния, которые проедут тележки до полной остановки, если масса левой относится к массе правой, как 1:3?

□ 318. Ракета, бывшая первоначально неподвижной, выбрасывает равномерной струей газы со скоростью $v_1 = 300 \frac{м}{сек}$

(относительно ракеты); расход газа равен $\mu = 90 \frac{г}{сек}$. Начальная масса ракеты равна $m = 270 г$.

а) Через сколько времени после пуска ракета достигнет скорости $v_2 = 40 \frac{м}{сек}$?

б) Какой скорости достигнет ракета, если масса ее заряда равна $m_0 = 180 г$? Сопротивлением воздуха пренебречь.

○ 3-19. Определить положение центра инерции (центр тяжести) масс системы, состоящей из четырех шариков с массами 1, 2, 3 и 4 г. в следующих случаях (рис. 3-9, а, б, в): а) шарики расположены на одной прямой; б) шарики расположены по вершинам квадрата; в) шарики расположены по четырем смежным вершинам куба.

Во всех случаях расстояния между соседними шариками равны 10 см.

△ 3-20. а) Определить положение центра инерции двойного однородного цилиндра, размеры которого показаны на рисунке 3-10.

б) Определить положение центра инерции пластинки, имеющей форму осевого сечения тела, изображенного на рисунке 3-10.

△ 3-21. Определить положение центра инерции фигуры в виде тонкого круглого диска с радиусом $r_1 = 5 дм$, в котором вырезано круглое отверстие с радиусом $r_2 = 3 дм$, причем центр отверстия лежит на расстоянии 1 дм от центра диска (рис. 3-11).

□ 3-22. Потенциальные энергии двух одинаковых сплошных прямых круглых конусов, один из которых стоит, а другой

лежит на горизонтальной плоскости, равны между собой. Определить угол между осью и образующей конуса.

△ 3-23. Два точечных тела составляют замкнутую систему, центр инерции которой покоится. Отношение масс тел равно $\frac{m_1}{m_2} = 2$. На



Рис. 3-12.

рисунке 3-12 показаны положения тел m_1 и m_2 в некоторый момент и траектория тела m_1 , являющаяся плоской кривой. Построить по точкам траекторию тела m_2 .

△ 3-24. На концах однородного стержня насажены два одинаковых шара. Стержень бросают, причем в начальный момент один из шаров движется со скоростью $32 \frac{м}{сек}$ по направлению, составляющему угол 60° с горизонтом, а другой шар движется в прямо противоположном направлении со скоростью $4 \frac{м}{сек}$. На какую высоту над начальным уровнем поднимется середина стержня?

△ 3-25. а) Каково ускорение центра инерции системы грузов m_1 и m_2 , описанных в задаче 3-4?

б) Какова скорость центра инерции в тот момент, когда груз m_2 достигает пола?

□ 3-26. На рисунке 3-13, а показаны две тележки А и В, соединенные натянутым шнуром, перекинутым через неподвижные блоки малой массы. На тележке А сидит пассажир С. Масса тележки В равна массе тележки А (100 кг) вместе с пассажиром С (50 кг). Трение в тележках и блоках ничтожно мало. Пассажир С встает, перемещается вдоль тележки вправо на 1,2 м и снова садится.

а) Как переместятся при этом тележки?

б) Как сместится при переходе пассажира центр инерции системы, состоящей из тележек и пассажира?

в) Ответить на вопросы а) и б) в случае расположения тележек, показанном на рисунке 3-13, б.

г) Как направлена результирующая сила, действующая на оси неподвижных блоков в случаях расположения тележек, показанных на рисунке 3-13, а и б?

□ 3-27. Лодка неподвижно стоит на озере. На корме и на носу лодки на рас-

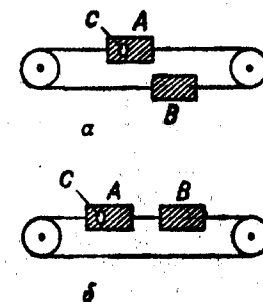


Рис. 3-13.

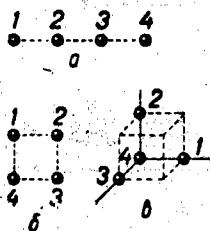


Рис. 3-9.

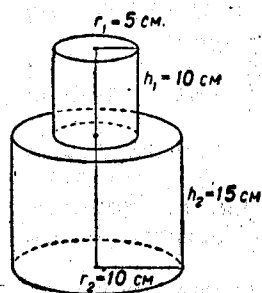


Рис. 3-10.

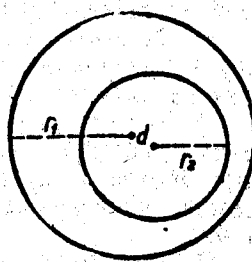


Рис. 3-11.

стоянии 2 м друг от друга сидят рыболовы. Масса лодки 140 кг, массы рыболовов 70 и 40 кг. Рыболовы меняются местами. Как перемещается при этом лодка?

Указание. При вычислении импульса вытесненной воды принять, что ее эффективная масса составляет 0,2 фактической величины.

О 3-28. Какую работу надо произвести, чтобы заставить поезд с массой 800 т:

а) увеличить свою скорость от 36 до $54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$?

б) остановиться при начальной скорости $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$?

О 3-29. При выстреле из винтовки давление расширяющихся газов производит работу 13 300 Дж; продолжительность выстрела $1,47 \cdot 10^{-3}$ сек; пуля массой 9,6 г вылетает со скоростью $880 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Определить полную и полезную мощность выстрела.

Δ 3-30. Паровоз тянет поезд, общая масса которого равна 2000 т. Принимая, что мощность паровоза постоянна и равна 1800 кВт и что коэффициент силы тяги равен 0,005, определить: а) ускорения поезда в те моменты, когда скорость его равна 4 и $12 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; б) максимальную скорость поезда.

Δ 3-31. Уклон участка шоссе равен 0,05. Спускаясь под уклон при выключенном двигателе, автомобиль движется равномерно со скоростью $60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Какова должна быть мощность двигателя автомобиля, чтобы он мог подниматься на такой же подъем с той же скоростью? Масса автомобиля 1,5 т.

Δ 3-32. Автомобиль движется вверх по слабому подъему с установившейся скоростью $3 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; если он движется в обратном направлении, т. е. под уклон, то при той же мощности двигателя устанавливается скорость $7 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Какая скорость v_0 установится при той же мощности мотора во время движения по горизонтальному пути? (При указанных скоростях можно принять, что сила тяги не зависит от скорости.)

Δ 3-33. Конькобежец движется по горизонтальному пути равномерно, а затем с разгона проезжает до остановки путь $s=60$ м в течение $t=25$ сек. Масса конькобежца $m=50$ кг. Определить, считая движение с разгона равнозамедленным:

а) коэффициент трения;

б) мощность, затрачиваемую конькобежцем при равномерном движении.

О 3-34. Камень массой 50 г, брошенный под углом к горизонту с высоты 20 м над поверхностью Земли со скоростью

$18 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, упал на Землю со скоростью $24 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Найти работу преодоления сопротивления воздуха.

Δ 3-35. Камень массой $m=200$ г брошен с горизонтальной поверхности под углом к горизонту и упал на нее обратно на расстоянии $s=5$ м через $t=1,2$ сек. Найти работу бросания. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Δ 3-36. На рисунке 3-14 показан школьный прибор для демонстрации сложения количеств движения, полученных шариком С при ударах молотков А и В. Показать, что путь, пройденный шариком С по горизонтальной плоскости при одновременном ударе молотков А и В, равен сумме путей, которые прошел бы шарик при таких же ударах молотков А и В в отдельности: $s=s_1+s_2$.

□ 3-37. Показать, что при упругом ударе тел их относительная скорость меняет свое направление, не меняясь по величине.

Указание. Решение задачи облегчается, если выбрать такую систему отсчета, в которой центр инерции соударяющихся тел покоится.

Δ 3-38. В ядерной технике часто бывает нужно уменьшать скорость нейтронов, выделяющихся при ядерных реакциях. Это осуществляется, например, при упругом ударе нейтрона в медленно движущееся ядро углерода (графит) или ядро дейтерия («тяжелый» водород).

а) Во сколько раз уменьшается энергия нейтрона при упругом лобовом ударе нейтрона в ядро углерода (при лобовом ударе нейтрон после удара движется в направлении, противоположном начальному)? Принять, что масса ядра углерода в $n=12$ раз больше массы нейтрона.

б) Во сколько раз уменьшается энергия нейтрона в случае, если после удара о ядро углерода он движется в направлении, перпендикулярном к начальному?

в) Произвести расчет а) и б) для удара нейтрона в ядро дейтерия, массу которого можно принять равной удвоенной массе нейтрона.

Δ 3-39. Показать, что изменение кинетической энергии тел при неупругом ударе зависит только от относительной скорости тел до удара и от их масс.

Δ 3-40. Молот массой 1,5 т ударяет по раскаленной болванке, лежащей на наковальне, и деформирует болванку. Масса наковальни вместе с болванкой равна 20 т. Определить коэффициент полезного действия при ударе молота, считая удар неупругим.

Примечание. Считать работу, произведенную при деформации болванки, полезной, а работу сотрясения фундамента — бесполезной.

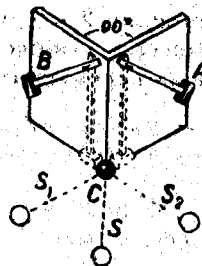


Рис. 3-14.

Δ 3-41. Два стальных шара подвешены на нитях так, что при их касании центры тяжести находятся на $l=1$ м ниже точек подвеса, а нити вертикальны. Массы их $m_1=800$ г и $m_2=200$ г. Меньший отводят в сторону так, что нить отклоняется на $\alpha=90^\circ$, и отпускают. Принимая шары за вполне упругие, определить: а) на какую высоту они поднимутся после удара; б) что произойдет, если таким же образом отклонить больший шар; в) при каком соотношении между массами шаров высоты, на которые они поднимутся после удара, равны между собой.

Δ 3-42. Три одинаковых упругих шарика висят, касаясь друг друга, на трех параллельных нитях одинаковой длины. Один из шариков отклоняют по направлению, перпендикулярному к прямой, соединяющей центры двух других шариков, и отпускают, причем он приобретает скорость v . Каковы скорости шариков после удара?

Δ 3-43. Быстро движущаяся молекула газа ударяется о другую молекулу того же газа, скорость которой в момент удара ничтожно мала. После удара молекулы летят в разные стороны. Показать, что угол между направлениями скоростей молекул после удара равен 90° , если удар был упругим (т. е. внутреннее состояние молекул после удара таково же, как и до удара), и меньше 90° , если удар был неупругим (т. е. энергия, зависящая от внутреннего состояния молекул, хотя бы у одной из них увеличилась, молекула перешла в «возбужденное» состояние), и больше 90° , если энергия, зависящая от внутреннего состояния хотя бы у одной из молекул, уменьшилась (молекула перешла из «возбужденного» состояния в нормальное).

Δ 3-44. На рисунке 3-15 показана схема установки для определения скорости пули так называемым баллистическим методом. На восьминитном подвесе висит полено с плоской верхней поверхностью (или ящик с песком). К полену привязана длинная нить, свободный конец которой продернут под картон, прикрепленный кнопками к деревянной вертикальной стойке, так, что нить расположена горизонтально. Расстояние от верхней поверхности полена до подвеса известно (l). В торец полена стреляют из ружья; полено отклоняется и протаскивает нить под картоном на длину s , значительно меньшую расстояния l . Принимая во внимание, что масса пули m_1 мала по сравнению с массой полена m_2 , показать, что скорость пули можно вычислить по формуле

$$v = \frac{m_2 s}{m_1} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

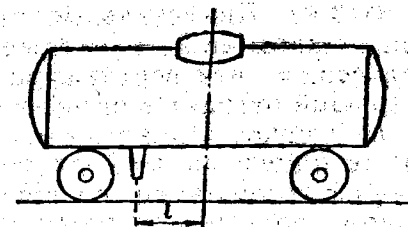


Рис. 3-16.

□ 3-45. Через два маленьких неподвижных блока, оси которых горизонтальны и находятся на одной высоте на расстоянии 90 см друг от друга, перекинута нить. К концам и к середине нити привязаны три одинаковых груза. Средний груз поднимают так, чтобы нить была горизонтальна и чтобы он находился посередине между блоками, и отпускают, после чего средний груз опускается, а крайние поднимаются.

а) С какой скоростью двигаются грузы в тот момент, когда части нити образуют угол 120° ?

б) Какой путь пройдет средний груз, прежде чем начать подниматься?

□ 3-46. На путях стоит цистерна с водой. Внизу цистерны расположена вертикальная трубка, смещенная к одной из пар колес (рис. 3-16). Как будет двигаться цистерна при сливании воды через трубку (трением пренебречь).

§ 4. Динамика вращательного движения

1) Точечное тело равномерно движется по окружности, если векторная сумма действующих на него сил направлена к центру окружности и равна $m\omega^2 R$ (m — масса, ω — угловая скорость, R — радиус окружности). То же соотношение можно применять к системе точек (например, к твердому телу конечных размеров) в случае, если по окружности радиуса R движется центр системы инерции.

2) Твердое тело, находящееся под действием вращающего момента M , движется с угловым ускорением

$$\epsilon = \frac{M}{J},$$

где J — момент инерции тела относительно оси вращения.

3) Кинетическая энергия вращающегося твердого тела

$$\frac{J\omega^2}{2}.$$

4) Работа при постоянном M равна $A = M\phi$, где ϕ — угол поворота вращающегося тела.

5) Мощность при вращении тела равна $P = M\omega$.

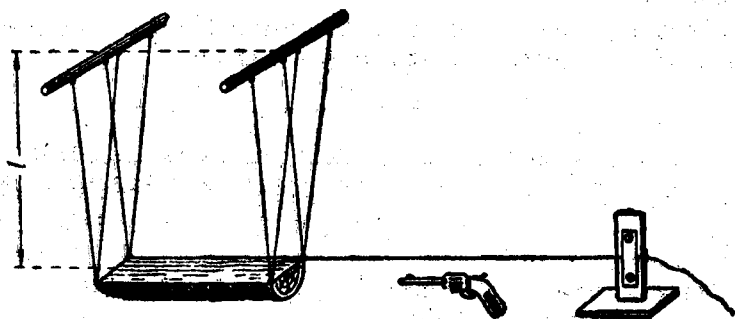


Рис. 3-15.

6) Векторная сумма моментов количества движения тел, составляющих замкнутую систему, постоянна по величине и по направлению.

7) Моменты инерции некоторых тел:

а) тонкостенной круглой трубы относительно оси, совпадающей с осью трубы mr^2 ;

б) тонкого стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей сквозь его середину $\frac{ml^2}{12}$;

в) сплошного круглого цилиндра относительно оси, совпадающей с его осью $\frac{mr^2}{2}$;

г) шара относительно оси, совпадающей с его диаметром, $0,4 mr^2$.

8) Соотношение Штейнера

$$J = J_0 + mb^2,$$

где J_0 — момент инерции тела относительно оси, проходящей сквозь центр инерции, J — момент инерции относительно оси, параллельной первой, b — расстояние между осями.

9) Соотношение между моментами инерции тонкого плоского тела (например, пластинки) относительно трех взаимно перпендикулярных осей, проходящих сквозь центр инерции (первая ось перпендикулярна к плоскости),

$$J_1 = J_2 + J_3.$$

10) На тело, движущееся со скоростью v относительно системы отсчета, вращающейся с угловой скоростью ω , действует сила инерции, перпендикулярная к плоскости, в которой лежат векторы v и ω , и равная

$$F = 2mv\omega \sin(\nu, \omega).$$

11) При трении качения в точке касания действует момент силы, равный

$$M = Nkr,$$

где N — прижимающая сила, k — безразмерный коэффициент трения качения, r — радиус кривизны. Момент направлен в сторону, препятствующую вращению. В точке касания приложена также сила трения покоя F (сила сцепления), направленная по касательной. Если внешняя сила, действующая на колесо, приложена в центре колеса и движение равномерно, то $F = Nk$. Если сила $F > Nk_1$, где k_1 — трение покоя, то колесо буксует.

В текстах некоторых задач буквой k' обозначен коэффициент трения качения, имеющий размерность длины

$$k' = kr.$$

○ 4-1. Шарик массой 100 г , привязанный к нити, движется в вертикальной плоскости по окружности радиусом 30 см .

а) С какой силой натянута нить в тот момент, когда шарик

проходит сквозь верхнее положение, если он движется со скоростью $210 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$?

б) С какой силой натянута нить, когда шарик проходит сквозь нижнее положение?

○ 4-2. а) Тело, масса которого равна 1 г , вблизи экватора весит $978,0 \text{ дин}$. Принимая экваториальный радиус Земли равным 6378 км , определить силу притяжения этого тела Землей.

б) Каков был бы вес тела массой 1 г на экваторе, если бы Земля вращалась в 10 раз скорее?

△ 4-3. На рисунке 4-1 изображен прибор для пояснения зависимости центробежной силы от массы и расстояния от оси вращения. Шары A и B имеют диаметры 3 и 2 см . Соединяющий шары шнур имеет длину $l = 10,5 \text{ см}$. Шары сделаны из одного и того же материала. Объемом канала, просверленного внутри шаров, можно пренебречь. Коэффициент трения шаров о стержень $k = 0,05$. Угловая скорость вращения прибора $\omega = 20 \text{ сек}^{-1}$.

Если расстояние шара A от оси лежит в некотором интервале $x \pm \Delta x$, то шары удерживаются на неизменном расстоянии от оси. Найти x и Δx .

△ 4-4. Небольшое тело скользит с вершины сферы вниз (рис. 4-2). На какой высоте h от вершины тело оторвется от поверхности сферы и полетит вниз? Трение ничтожно мало.

△ 4-5. а) Небольшое тело соскальзывает вниз по наклонному скату, переходящему в мертвую петлю радиуса R (рис. 4-3). На какой высоте h_1 выпадает тело, если начальная его высота равна h ? Трение ничтожно мало.

б) Какова должна быть высота h , чтобы тело сделало полную петлю, не выпадая?

□ 4-6. Круглый стальной конус высотой 10 см и диаметром основания 8 см катится без скольжения по горизонтальной плоскости, делая один оборот вокруг вертикальной оси OO' в течение 2 сек (рис. 4-4). Определить силу статического трения между образующей конуса и плоскостью, по которой он катится.

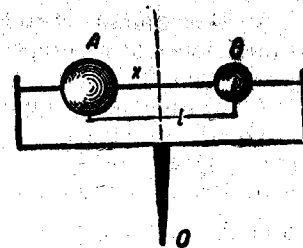


Рис. 4-1.

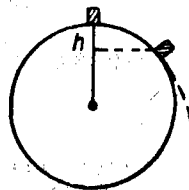


Рис. 4-2.

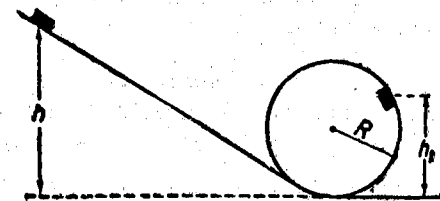


Рис. 4-3.

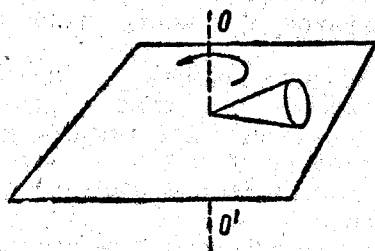


Рис. 4-4.

□ 4-7. Если связать концы металлической цепочки между собой, привязать цепочку к шнуру и вращать шнур (посредством центробежной машины), то цепочка принимает форму, близкую к окружности, расположенной в плоскости, перпендикулярной к оси вращения (рис. 4-5).

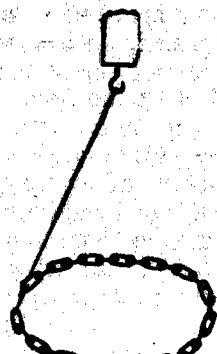


Рис. 4-5.

а) Является ли форма цепочки плоской кривой?

б) Принимая форму цепочки за горизонтальную окружность, определить силу F натяжения вдоль цепочки, если ее масса $m=100$ г, длина $l=75$ см, цепочка вращается с частотой оборотов, равной $n=8$ сек⁻¹.

△ 4-8. На рисунке 4-6 в упрощенном виде изображена центрифуга. В пробирки покоящейся центрифуги налили жидкость плотностью $1,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ до высоты 6 см над дном. При вращении центрифуги пробирки движутся, имея почти горизонтальное направление. Определить давление жидкости на дно пробирок во время вращения центрифуги, если дно пробирки движется на расстоянии 10 см от оси вращения и если частота оборотов центрифуги равна 20 сек⁻¹.

△ 4-9. Одинаковые упругие шарики, подвешенные на нитях одинаковой длины к одному крючку (рис. 4-7), отклоняют в разные стороны от вертикали на угол α и отпускают. Шарики ударяются и отскакивают друг от друга. Какова сила действующая на крючок: а) при крайних положениях нитей; б) в начальный и конечный моменты удара шариков; в) в момент наибольшей деформации шариков.

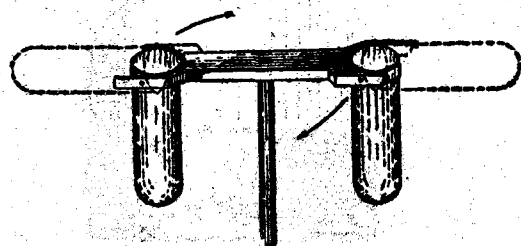


Рис. 4-6.

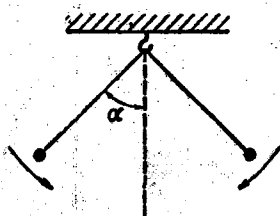


Рис. 4-7.

△ 4-10. Грузик, подвешенный на нити, отводят в сторону так, что нить принимает горизонтальное положение, и отпускают. При движении грузика вертикальная составляющая его скорости сперва возрастает, затем убывает. Какой угол с вертикалью образует нить в тот момент, когда вертикальная составляющая скорости грузика наибольшая?

—О 4-11. Школьную модель центробежного регулятора (рис. 4-8) вращают с частотой оборотов $n=3$ сек⁻¹. На какой угол отклоняются при этом стержни, несущие шары MM ? Длина стержней $l=14$ см. Массой всех деталей, кроме шаров, пренебречь.

—О 4-12. а) С какой максимальной скоростью может ехать по горизонтальной плоскости мотоциклист, описывая дугу радиусом $R=90$ м, если коэффициент статического трения резины о почву $\mu=0,4$?

б) На какой угол α от вертикального направления он должен при этом отклониться?

△ 4-13. Один из цирковых аттракционов: езда мотоциклистов по вертикальным стенкам цилиндрического строения (рис. 4-9).

а) Определить минимальную скорость, с которой должен ехать по вертикальной стенке мотоциклист, если диаметр строения $d=18$ м, центр тяжести мотоцикла и человека отстоит на $h=1$ м от места соприкосновения колес со стенкой, коэффициент трения шин о стенки равен $\mu=0,4$.

б) Под каким углом α к горизонту наклонен мотоциклист, если его скорость равна $20 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

△ 4-14. Грузик привязан к нити, другой конец которой прикреплен к потолку. Вследствие толчка грузик движется по окружности, плоскость которой отстоит от потолка на $h=1,5$ м. Какова частота оборотов грузика?

□ 4-15. Два грузика ($m_1=100$ г, $m_2=50$ г) привя-

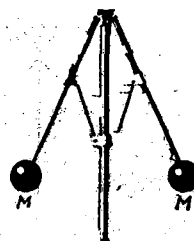


Рис. 4-8.

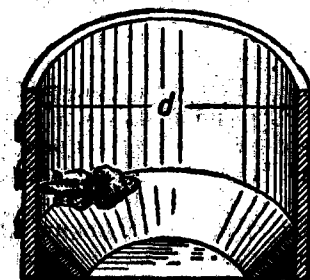


Рис. 4-9.

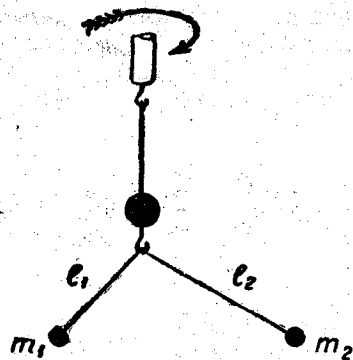


Рис. 4-10.

заны к нитям, длины которых равны $l_1=28$ см, $l_2=30$ см. Другие концы нитей привязаны к третьему грузику, подвешенному на проволочке к крючку. Крючок можно вращать около вертикальной оси (рис. 4-10). При какой частоте оборотов проволочка над грузиком остается вертикальной?

○ 4-16. Двигатель мощностью 0,1 *квт* приводит в движение токарный станок, причем обрабатываемый на станке деревянный цилиндр диаметром 6 см вращается с частотой оборотов, равной 600 *мин*⁻¹.

Определить силу, которой резец отделяет стружку, принимая, что мощность на станке составляет 80% мощности двигателя.

△ 4-17. Легковой автомобиль работает в таком режиме: мощность двигателя 30 *квт*, потери в трансмиссии 10%; частота оборотов коленчатого вала 180 *мин*⁻¹, частота оборотов ведущей задней оси в 5,125 раза меньше. База автомобиля (расстояние между передней и задней осями) 2,7 м. Каковы при таком режиме нагрузки на переднюю и заднюю оси, если при покоящемся автомобиле нагрузки равны 7900 и 9100 *н*?

○ 4-18. Определить момент инерции системы шариков, описанной в задаче 3-19 а), относительно оси, перпендикулярной к прямой, на которой расположены шарики, и проходящей сквозь а) первый; б) второй; в) третий; г) четвертый шарики.

□ 4-19. Определить момент инерции системы, состоящей из четырех точечных масс m , расположенных по вершинам квадрата со стороной a относительно оси, проходящей сквозь центр квадрата в следующих случаях: а) ось лежит в плоскости квадрата и образует с диагональю острый угол, не равный 45°; б) ось не лежит в плоскости квадрата.

□ 4-20. Определить момент инерции медного диска радиусом 5 см, в котором сделаны два выреза в виде кругов радиусами 2 см; центры вырезов находятся на прямой, проходящей сквозь центр диска на расстоянии 2,5 см от него (рис. 4-11). Толщина диска 0,1 см. Рассмотреть следующие случаи: а) ось перпендикулярна к плоскости диска и проходит сквозь его центр; б) ось проходит сквозь центры вырезов; в) ось проходит сквозь центр диска и перпендикулярна к осям, указанным в а) и б).

✓ ○ 4-21. Два маленьких шарика ($m_1=40$ г, $m_2=120$ г) соединены стержнем ($l=20$ см), масса которого ничтожно мала. Система вращается около оси, перпендикулярной к стержню и проходящей сквозь центр инерции системы. Определить

импульс и момент количества движения системы. Частота оборотов равна 3 *сек*⁻¹.

△ 4-22. Указать, какие моменты сил и силы действуют в следующих случаях:

а) Колесо вагона поезда во время ускорения поезда увеличивает свою скорость.

б) Шарик замедленно катится по горизонтальной плоскости.

△ 4-23. Определить ускорения, с которыми движутся вдоль плоскости, наклоненной под углом α к горизонту, центры инерции следующих тел: а) доски, скользящей с ничтожным трением; б) сплошного цилиндра, скатывающегося с ничтожным трением качения; в) доски, положенной на два цилиндра. Масса доски равна массе каждого из цилиндров.

△ 4-24. Две прочные линейки расположены параллельно друг другу на расстоянии $d=2$ см под углом $\alpha=5^\circ$ к горизонту (рис. 4-12). С каким ускорением будет катиться по ним шарик, радиус которого равен $r=1,5$ см? Скольжение отсутствует.

△ 4-25. По тонкому стержню, покоящемуся на гладком столе, производят в некоторой точке А (рис. 4-13) удар в горизонтальном направлении.

а) Показать, что в момент удара стержень вращается около вертикальной оси, проходящей сквозь точку О, причем, если трение мало, имеет место соотношение

$$s_1 s_2 = \frac{J_c}{m},$$

где m — масса стержня, J_c — момент инерции стержня относительно оси, проходящей сквозь центр инерции стержня (С), s_1 и s_2 — расстояния точек А и О от С.

б) Что произойдет, если ударить по стержню в точке О?

в) Где будет проходить ось вращения, если ударить по самому концу стержня?

○ 4-26. Двигатель равномерно вращает маховик. После отключения двигателя маховик делает в течение $t=30$ сек $N=120$ оборотов и останавливается. Момент инерции маховика $J=0,3$ *кг·м*². Принимая, что угловое ускорение маховика

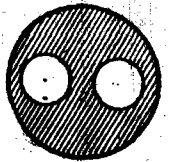


Рис. 4-11.

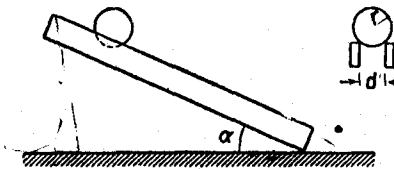


Рис. 4-12.

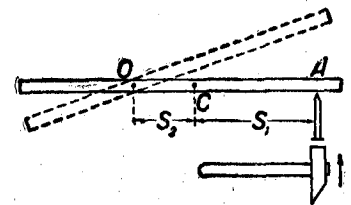


Рис. 4-13.

после отключения двигателя постоянно, определить мощность двигателя при равномерном вращении маховика.

О 4-27. Какую работу нужно произвести, чтобы увеличить частоту оборотов маховика, массу которого $0,5 \text{ т}$ можно считать распределенной по ободу диаметром $1,5 \text{ м}$, от 0 до 120 мин^{-1} ? Трением пренебречь.

Δ 4-28. а) Вертикальный столб высотой $h=5 \text{ м}$ подпиливается у основания и падает на Землю. Определить линейную скорость его верхнего конца в момент удара о Землю.

б) Какая точка столба будет в любой момент падения иметь ту же скорость, какую имело бы тело, падая с такой же высоты, как и данная точка?

Δ 4-29. Массивное колесо, насаженное на ось, поддерживается двумя нитями, закрепленными, как показано на рисунке 4-14. Ось вращения колеса горизонтальна. Нити постепенно раскручиваются с оси, а колесо опускается.

а) Определить натяжение F каждой из двух нитей, если масса колеса вместе с осью $m=1 \text{ кг}$, момент инерции относительно этой оси $J=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и радиус оси $r=5 \text{ мм}$.

б) Каково будет натяжение F каждой нити, когда колесо, опустившись до конца и продолжая вращаться по инерции, начнет накручивать нить на ось и подниматься?

в) Предположим, что доска, к которой прикреплены поддерживающие нити прибора, поднимается, оставаясь горизонтальной, так что диск остается на неизменной высоте. Каково натяжение нитей?

□ 4-30. На круглый сплошной цилиндр A (рис. 4-15) навит шнур. Цилиндр положен на два параллельных стержня BB' , наклоненных к горизонту под углом $\alpha=30^\circ$, и удерживается в этом положении рукой. Другой конец шнура перекинут через неподвижный блок C , расположенный так, что шнур параллелен стержням. К шнуру прикреплен груз D , масса которого равна массе цилиндра, умноженной на $\sin \alpha$, т. е. такова, что при отсутствии вращения наблюдалось бы равновесие. Как будут дви-

гаться цилиндр и груз, если цилиндр отпустить? Трение и момент инерции блока считать ничтожно малыми.

Δ 4-31. Стержень ничтожной массы, длины l , с двумя маленькими шариками m_1 и m_2 ($m_1 > m_2$) на концах может вращаться около оси, проходящей через середину стержня перпендикулярно к стержню. Стержень приводят в горизонтальное положение и отпускают. Определить: а) угловое ускорение и силу давления на ось в начальный момент движения стержня; б) угловую скорость и силу давления на ось в момент прохождения через положение равновесия.

Δ 4-32. Деревянный стержень массой $m=1000 \text{ г}$ и длиной $l=40 \text{ см}$ может вращаться около оси, проходящей через его середину перпендикулярно к стержню. В конец стержня попадает пуля массой $m_1=10 \text{ г}$, летящая перпендикулярно к оси и к стержню со скоростью $v=200 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

а) Определить угловую скорость, которую получит стержень, если пуля застрянет в нем.

б) Как изменилась при попадании пули в стержень общая сумма их кинетических энергий?

О 4-33. Горизонтально расположенный диск может вращаться около вертикальной оси, проходящей сквозь центр диска. На диске помещены два одинаковых грузика так, что их центры инерции расположены симметрично по отношению к центру диска. Грузики соединены ниткой. При вращении диска грузики удерживаются на своих местах натяжением нити и трением о диск. Трение в оси диска и сопротивление воздуха ничтожно малы. В некоторый момент нить пережигается и грузики скользят к краям диска, причем производится работа по преодолению трения. Как меняются при движении грузиков: а) кинетическая энергия диска и грузиков; б) количества движения диска и грузиков; в) моменты количества движения диска и грузиков?

Δ 4-34. На вращающемся столике, употребляющемся в физических кабинетах для демонстраций, стоит человек, держащий на вытянутых руках на расстоянии $l_1=150 \text{ см}$ друг от друга две гири. Столик вращается с частотой оборотов $n_1=1 \text{ сек}^{-1}$. Человек сближает гири до расстояния $l_2=80 \text{ см}$, и частота оборотов увеличивается до $n_2=1,5 \text{ сек}^{-1}$. Определить работу, произведенную человеком, если каждая гиря имеет массу $m=2 \text{ кг}$. Момент инерции человека относительно оси столика считать постоянным.

Δ 4-35. Горизонтальный диск вращается вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω_1 ; его момент инерции относительно оси вращения J_1 . На него падает другой диск с моментом инерции относительно той же оси J_2 и угловой скоростью ω_2 . Плоскости дисков параллельны, центры — на одной вертикальной линии. Нижняя поверхность падающего диска снабжена шипами, которые впадают в верхнюю поверхность нижнего дис-

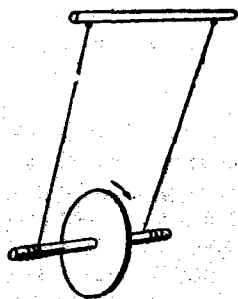


Рис. 4-14.

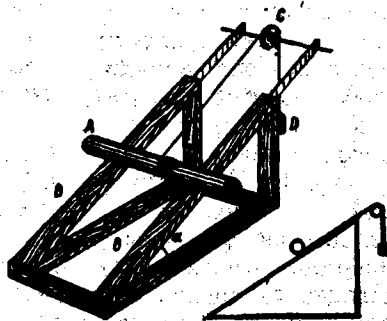


Рис. 4-15.

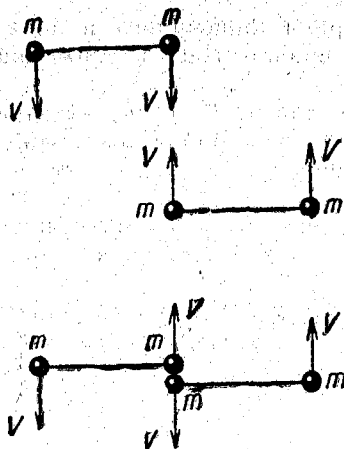


Рис. 4-16.

При этом угловая скорость диска A уменьшается, а диска B увеличивается в противоположном направлении, причем сумма их моментов количества движения уменьшается.

б) Две пары жестко соединенных упругих шаров (гантели) движутся поступательно с одинаковыми скоростями навстречу одна другой, как показано на рисунке 4-16. Момент количества движения каждой гантели равен нулю. В некоторый момент средние шары ударяются друг о друга, после чего движутся в противоположных направлениях. Гантели начинают вращаться, причём моменты количества движения гантелей направлены одинаково и их сумма не равна нулю.

△ 4-37. Тонкий однородный стержень вращается около оси, проходящей сквозь его середину перпендикулярно к нему. В некоторый момент стержень разделяется на две равные части, которые, продолжая вращаться, отдаляются друг от друга. Принимая отделившиеся части за однородные стержни вдвое меньшей длины и пренебрегая работой, совершаемой при разделении, показать: а) что сумма моментов количества движения половин стержня равна моменту количества движения стержня до разделения;

б) что энергия системы двух половинок стержня равна энергии вращения стержня до разрыва.

△ 4-38. Определить полную кинетическую энергию при качении без скольжения со скоростью v по плоской поверхности:

- цилиндра, имеющего массу m ;
- шара, имеющего массу m ;
- тележки, масса которой без колес равна m , имеющей четыре колеса в виде дисков с массой $\frac{m}{4}$ каждый.

ка и скрепляют диски в одно целое.

а) Найти угловую скорость ω получившейся системы.

б) На сколько изменится общая кинетическая энергия обоих дисков после падения второго диска?

в) Чем объяснить изменение общей кинетической энергии дисков?

□ 4-36. Согласовать с законом сохранения моментов количества движения следующие явления:

а) Диск A вращается с ничтожным трением около оси, проходящей сквозь его центр перпендикулярно к его плоскости и закрепленной на столе. К нему прикасаются другим таким же диском B , ось которого держат в руке.

○ 4-39. При каком радиусе шарика, описанного в задаче 4-24, энергии поступательного и вращательного движений шарика равны между собой?

△ 4-40. Шарик, диаметр которого равен $d=6$ см, катится по полу и останавливается через $t=2$ сек, пройдя расстояние $s=70$ см. Определить коэффициент трения качения, считая его постоянным.

□ 4-41. Шарик находится на горизонтальной пластинке, перемещающейся с ускорением a . При каком условии шарик движется поступательно с тем же ускорением?

□ 4-42. Пластинку наклоняют и на нее помещают шарик. При каком угле наклона α шарик будет скатываться без скольжения, если коэффициент максимального статического трения равен $\mu=0,25$, коэффициент трения качения $k'=0,1$ см и диаметр шарика $d=5$ см?

△ 4-43. На двух нитях подвешен шарик радиусом 1 см. Шарик вращают, нити закручиваются, вследствие чего шарик поднимается (рис. 4-17). Когда было сделано 20 оборотов, шарик поднялся на 1,2 см. Затем шарик отпускают и нити раскручиваются. Каковы скорость центра шарика и частота оборотов, когда он вернется к начальному уровню?

△ 4-44. Диаметр подшипника оси железнодорожного вагона равен 27 см, диаметр колеса — 180 см. Коэффициент трения в подшипнике равен 0,01 (при хорошей смазке), коэффициент трения качения колеса на рельсах равен 0,05 см. Определить работу передвижения вагона весом 50 т на пути 1 км.

□ 4-45. Шар, радиус которого равен r , скатывается по наклонному скату и описывает «мертвую петлю» радиуса R . Пренебрегая трением качения и сопротивлением воздуха, найти наименьшую высоту h центра шарика над центром петли, при которой это возможно.

— ○ 4-46. Горизонтально расположенный прут вращается около вертикальной оси с частотой оборотов $n=1$ сек⁻¹. Вдоль него скользит со скоростью $v=50$ $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$ муфта, масса которой равна $m=100$ г. Определить горизонтальную составляющую действующей на муфту силы.

○ 4-47. Определить горизонтальную составляющую силы, с которой прижимается к рельсу паровоз, масса которого равна 1000 т, если он движется по горизонтальному участку пути на широте 50° со скоростью 15 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

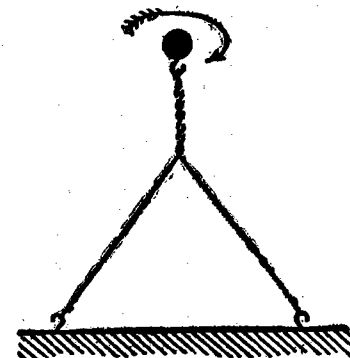


Рис. 4-17.

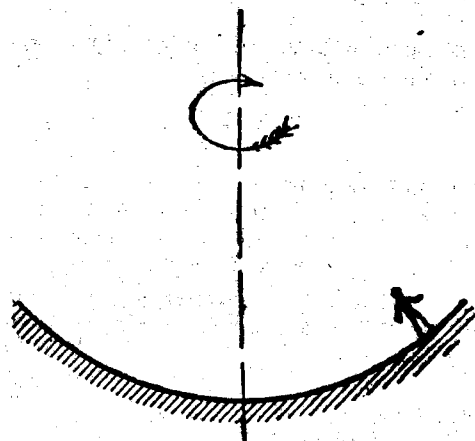


Рис. 4-18.

□ 4-48. В «Занимательной физике» Я. И. Перельмана описано вращающееся помещение с полом, имеющем форму параболоида вращения (рис. 4-18).

а) Показать, что при определенной угловой скорости помещения человек, стоящий на полу, в любом месте располагается так, что прямая, проходящая сквозь центр инерции человека и многоугольника его опоры на пол, нормальна к поверхности пола в рассматриваемом месте.

б) Показать, что при равномерном перемещении человека по полу помещения в любом направлении он не производит никакой работы, кроме той, которую производит, перемещаясь по горизонтальному полу.

в) При удалении человека от оси вращения увеличивается и потенциальная энергия системы (человек поднимается) и кинетическая энергия системы (линейная скорость человека возрастает). За счет чего меняется энергия системы?

○ 4-49. Предположим, что велосипедист катится по горизонтальной, вращающейся около вертикальной оси плоскости в таком направлении и с такой скоростью, что относительно Земли он является неподвижным. Должен ли он наклоняться по направлению к оси вращения плоскости? (Считать Землю инерциальной системой.)

△ 4-50. Найти ускорение, с которым движется (замедленно) обруч, катящийся по инерции по горизонтальной поверхности с трением качения $k=0,01$.

△ 4-51. Груз весом $P=10^4$ н перемещается равномерно на катках (вес которых $\ll P$). Коэффициент трения катков о пол $k_1=0,01$, а груз $k_2=0,02$. Найти внешнюю силу, приложенную к грузу.

§ 5. Закон всемирного тяготения

1) Сила притяжения двух точечных тел с массами m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r , равна

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

где γ — гравитационная постоянная.

2) Однородный шаровой слой или шар притягивают внешнюю точку так, как будто его масса сосредоточена в центре. Внутреннюю точку шаровой слой не притягивает.

3) Планеты обращаются вокруг Солнца по законам Кеплера (приблизительно); этим же законам подчиняется движение спутников вокруг планет.

○ 5-1. Какова сила притяжения Солнцем тела массой $m=1$ г, находящегося на поверхности Земли?

△ 5-2. Тело, находящееся на поверхности Земли, притягивается и к Земле, и к Солнцу. В той точке поверхности Земли, для которой Солнце находится в зените, эти силы имеют противоположное направление. В той точке, для которой Солнце находится в надире, эти силы имеют одинаковое направление. Следует ли вывести отсюда, что днем тела падают медленнее, чем ночью, в том же месте поверхности Земли?

△ 5-3. а) Является ли вполне строгим утверждение, что при отсутствии сопротивления воздуха падающие тела имеют по отношению к поверхности Земли одно и то же ускорение независимо от их массы?

б) В некоторых учебниках указывается, что ускорение, с которым движется Луна по отношению к Земле, равно

$$a = g \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2,$$

где g — ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли, R_1 — радиус Земли и R_2 — расстояние между центрами Земли и Луны. Найти относительную погрешность, которая делается при таком утверждении.

○ 5-4. Определить силы, с которыми действуют друг на друга вследствие тяготения два соприкасающихся свинцовых шара диаметром по 1 м каждый.

□ 5-5. Два твердых шара, плотности которых равны D_1 и D_2 , находятся в жидкости с плотностью D_0 вдали от границ жидкости. При каком условии шары притягиваются друг к другу и при каком отталкиваются?

□ 5-6. Шарик массой m_1 находится на расстоянии a от конца тонкого однородного стержня массой m_2 и длиной l (рис. 5-1).

а) Определить силу притяжения шарика и стержня.

б) Приняв длину стержня $l=2a$, вычислить, как изменит-

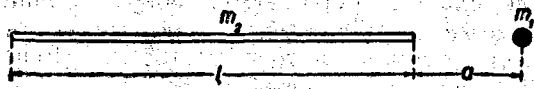


Рис. 5-1.

ся сила притяжения, если стержень заменить шариком массой m_2 , помещенным в том месте, где находится центр инерции стержня.

○ 5-7. Пренебрегая изменением веса вследствие вращения Земли и Луны, вычислить, сколько весил бы на поверхности Луны человек, весящий на Земле 720 н.

△ 5-8. Найти напряженность поля тяготения планеты радиусом 6000 км в точках, расстояние которых от центра планеты равно: 0, 1000 км, 2000 км, 3000 км, 4000 км, 5000 км, 6000 км, 8000 км, 10 000 км и 12 000 км, и вычертить соответствующий график в двух случаях:

а) Плотность вещества планеты одинакова по всему объему и равна $5 \frac{г}{см^3}$; вне планеты плотность среды близка к нулю.

б) Плотность вещества планеты в объеме от центра до 4350 км равна $10 \frac{г}{см^3}$, далее до 6000 км равна $2 \frac{г}{см^3}$, вне планеты близка к нулю.

□ 5-9. Внутри однородного шара имеется сферическая полость. Показать, что поле тяготения внутри полости однородно. Зная плотность вещества шара и расстояние между центрами шара и полости (l), найти ускорение тел, движущихся в полости.

□ 5-10. а) Центр тяжести корабля водоизмещением 10 000 т на $h=5$ м выше центра тяжести вытесненной им воды. На сколько масса корабля разнится от массы вытесненной воды? Вес воздуха не учитывать или считать причисленным к весу воды.

б) Какова результирующая сила, с которой действуют друг на друга два таких корабля, находящихся на расстоянии 1 км?

○ 5-11. Где находится точка, в которой силы притяжения к Земле и к Луне взаимно уравновешиваются?

△ 5-12. 4 октября 1957 г. в СССР произведен запуск первого в мире искусственного спутника Земли. Спутник имел форму шара диаметром 58 см, масса его 83,6 кг; спутник описывал эллиптические траектории вокруг Земли, причем в некоторые моменты достигал высоты 900 км над поверхностью Земли. Период обращения спутника вокруг Земли оказался равным 1 ч 36,2 мин. Предположим, что спутник двигался вокруг центра Земли по круговой траектории. Какой высоте над поверхностью Земли, какой скорости и какой кинетической энергии соответствовал бы в таком случае указанный период обращения?

○ 5-13. Две планеты обращаются вокруг Солнца по орбитам, принимаемым приближенно за круговые с радиусами $R_1=150 \cdot 10^6$ км (Земля) и $R_2=108 \cdot 10^6$ км (Венера). Найти отношение их линейных скоростей v_1 и v_2 .

□ 5-14. С какой скоростью упадет на поверхность Луны метеорит, скорость которого вдали от Луны мала? Атмосфера на Луне отсутствует.

□ 5-15. На какое расстояние от поверхности Земли удалось бы тело, брошенное вертикально вверх со скоростью $5 \frac{км}{сек}$, если бы атмосфера у Земли отсутствовала?

□ 5-16. Предположим, что механическая энергия системы искусственный спутник—Земля уменьшилась вследствие потери на трение на 2%. Принимая, что орбита спутника и до потери энергии и после нее мало отличается от окружности, вычислить, как изменится при потере 2% энергии: а) радиус орбиты; б) скорость спутника; в) период обращения.

□ 5-17. Чему равна сумма кинетической и потенциальной энергии планеты с массой m , обращающейся вокруг Солнца по эллипсу, большая полуось которого равна a ? Рассмотреть положения планеты в точках ее орбиты с наименьшей и с наибольшей кривизной.

Указание. Наименьший и наибольший радиусы кривизны эллипса равны $\frac{b^3}{a}$ и $\frac{a^3}{b}$, где a и b — полуоси эллипса.

□ 5-18. Сколько времени падало бы на Солнце тело с расстояния, равного радиусу земной орбиты?

□ 5-19. Метеорит, имеющий на большом расстоянии от Земли относительную скорость $v \frac{км}{сек}$, попадает на Землю, если его «прицельный параметр» ρ (расстояние асимптоты орбиты от центра Земли) меньше критического значения $\rho < \rho_k$. Определить величину эффективного сечения захвата метеорита Землей $\sigma = \pi \rho_k^2$.

□ 5-20. Показать, что задача о движении трех тел, притягивающихся по закону Ньютона (массы m_1, m_2, m_3 которых сравнимы по величине и могут быть различными), имеет частное решение, при котором тела вращаются вокруг общего центра тяжести, образуя равносторонний треугольник (решение Лагранжа). Определить частоту вращения.

§ 6. Статика твердого тела

1) Условия равновесия твердого тела:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0; \quad \Sigma F_y = 0; \quad \Sigma F_z = 0; \\ \Sigma M_x &= 0; \quad \Sigma M_y = 0; \quad \Sigma M_z = 0, \end{aligned}$$

где F_x , F_y и F_z ; M_x , M_y и M_z — проекции векторов сил и вращающих моментов, действующих на тело, на прямоугольные оси координат. Те же условия относятся к равномерному прямолинейному поступательному движению.

Можно пользоваться теми же условиями и при неравномерном движении, если присоединить к реально действующим силам силы инерции.

2) Сила статического трения может иметь в зависимости от условий задачи при данной нормальной силе давления любое значение от нуля до некоторого максимального значения, определяемого нормальным давлением и природой трущихся тел.

Коэффициентом статического трения μ называется отношение максимальной силы статического трения к нормальной силе давления. Коэффициент трения при скольжении всегда меньше коэффициента статического трения.

○ 6-1. На плоской поверхности, образующей с горизонтом угол 20° , лежит доска, в верхнюю сторону которой вбит гвоздь, проходящий сквозь ее центр тяжести. Коэффициент статического трения доски по наклонной поверхности равен 0,4. Масса доски равна 0,5 кг. Определить максимальную силу, с которой можно надавить на гвоздь, не вызывая движения доски, в следующих случаях:

- а) сила параллельна поверхности, образует с горизонтом угол 20° и направлена вверх;
- б) сила противоположна этому направлению;
- в) сила горизонтальна и образует с наклонной поверхностью угол 20° .

○ 6-2. Между двумя гвоздями натянут шнур длиной 1,7 м. Расстояние между гвоздями равно 1,5 м. На шнур повешен груз весом 200 н (рис. 6-1). Определить натяжение шнура, пренебрегая изменением длины шнура при навешивании груза.

○ 6-3. Шар, масса которого равна 5 кг, опирается на две гладкие ($\mu=0$) плоскости, образующие угол, причем левая образует с горизонтом угол $\alpha=35^\circ$, а правая — угол $\beta=20^\circ$ (рис. 6-2). Определить силы, с которыми шар давит на плоскости.

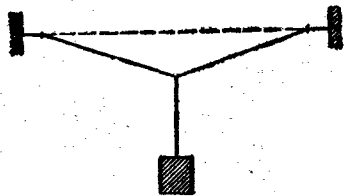


Рис. 6-1.

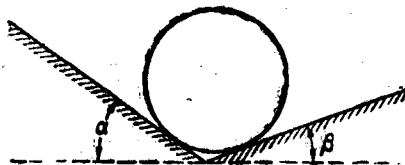


Рис. 6-2.

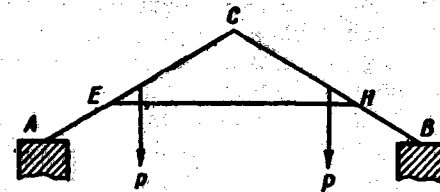


Рис. 6-3.

△ 6-4. Предположим, что в условиях предыдущей задачи плоскости не были бы гладкими и μ было бы отлично от нуля. Как изменилось бы решение задачи?

△ 6-5. На каждое из стропил (AC и CB на рис. 6-3) действует сила тяжести крыши и стропил, равная $8 \cdot 10^3$ н. Стропила удерживаются от раздвигания затяжкой EH, длина которой в 1,5 раза меньше расстояния между концами стропил (AB) и в 1,2 раза больше длины стропила (AC). Силы тяжести можно считать приложенными в середине стропила. Каковы силы, действующие на затяжку?

○ 6-6. Трое рабочих несут металлическую плиту в виде разностороннего треугольника, поддерживая ее за вершины. Доказать, что на долю каждого приходится одна и та же тяжесть.

○ 6-7. На доске, положенной на козлы, стоит человек массой 60 кг. Вес доски 800 н. Размеры показаны на рисунке 6-4. Определить силы, действующие на опоры.

△ 6-8. Для определения положения центра инерции автомобиля произвели три взвешивания: 1) обе оси автомобиля поместили на весах; общий вес автомобиля оказался равным $2,71 \cdot 10^4$ н; 2) задняя ось осталась на весах, а передняя опиралась на опору, находящуюся на одном уровне с площадкой весов; весы показали $1,41 \cdot 10^4$ н; 3) задняя ось на весах, передняя поднята на высоту 60 см по сравнению с задней; весы показали $1,473 \cdot 10^4$ н. Определить высоту центра инерции автомобиля над площадью опоры. Известно, что база автомобиля (расстояние между осями) равна 3,3 м, а рабочий радиус колес 0,42 м.

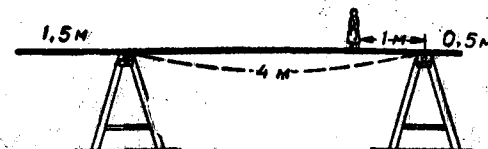


Рис. 6-4.

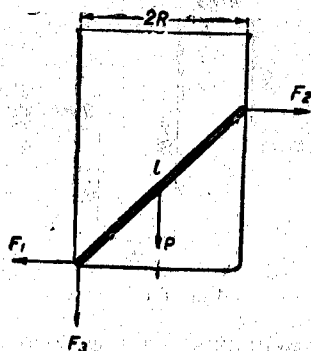


Рис. 6-5.

△ 6-9. В гладкий цилиндрический стакан помещена палочка, как показано на рисунке 6-5. Длина палочки $l=15$ см, масса 30 г. С какими силами действует палочка на дно и стенки стакана, если радиус дна $R=7$ см? Трением пренебречь.

△ 6-10. Ферма сделана из железных стержней одного и того же сечения так, как показано на рисунке 6-6. Опора B устроена так, что она не несет вертикальной нагрузки. Вес стержня AB равен 500 н. Определить силы, действующие на опоры A и B .

□ 6-11. Нагруженная тележка находится на горизонтальном рельсовом пути (рис. 6-7). Расстояние между ее осями равно 80 см. Оси находятся на высоте 20 см над полотном. Если тележка не движется, то силы давления на левую и правую оси тележки равны соответственно 10^3 и $0,9 \cdot 10^3$ н.

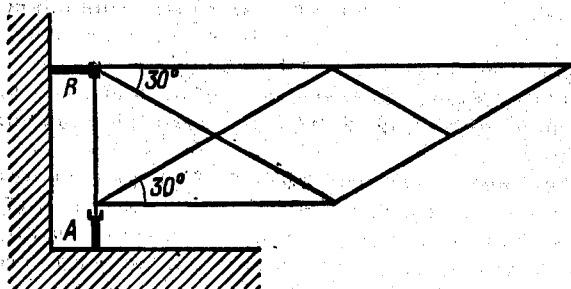


Рис. 6-6.

а) На тележку давят силой 40 н, приложенной на высоте 140 см над полотном, и она равномерно движется в направлении силы (слева направо). Каковы силы давления на оси в движущейся тележке?

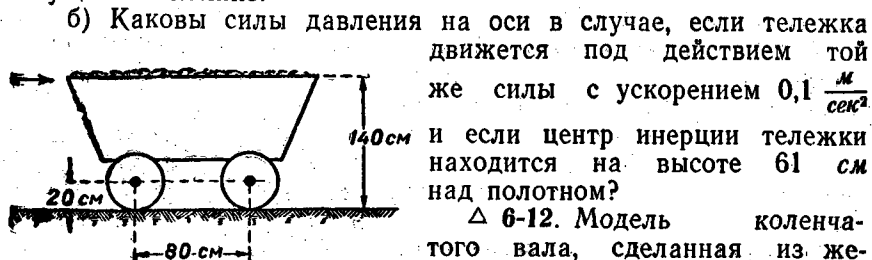


Рис. 6-7.

б) Каковы силы давления на оси в случае, если тележка движется под действием той же силы с ускорением $0,1 \frac{м}{сек^2}$ и если центр инерции тележки находится на высоте 61 см над полотном?

△ 6-12. Модель коленчатого вала, сделанная из железного прута диаметром 1 см, как показано на рисунке 6-8,

вращается в подшипниках A и B с частотой оборотов, равной 5 сек^{-1} . Определить силы давления вала на опоры: а) в момент, когда колена вала расположены вертикально; б) когда колена вала расположены горизонтально.

△ 6-13. а) У гладкой ($\mu=0$) стены стоит лестница. Коэффициент статического трения лестницы о землю равен $\mu_2=0,5$. Центр тяжести лестницы можно считать находящимся в середине ее. Определить наименьший угол ϕ , который лестница может образовать с горизонтом, не падая.

б) Предположим, что лестница поставлена в такое положение, что малейшее уменьшение угла должно повести к ее падению. Упадет ли лестница, если человек встанет на ее нижнюю ступеньку? на ее верхнюю ступеньку?

□ 6-14. Тонкий стержень длиной $l=100$ см, сделанный из дерева плотностью $D=0,8 \frac{г}{см^3}$, подвешен за один из концов, а другим погружен в воду. Определить угол α между направлением стержня и вертикалью, если верхний конец находится над уровнем воды на высоте h , равной: а) 30 см; б) 70 см.

△ 6-15. Какую работу надо произвести, чтобы повернуть на другую грань сплошной железный куб, масса которого равна 200 кг?

□ 6-16. Сосуд с тонкими стенками, имеющий форму полого куба без верхнего основания, наполовину наполнен водой. Ребро куба равно 20 см. Какую работу нужно произвести, чтобы опрокинуть сосуд на боковую грань (причем вода из него выльется)? Вес сосуда равен 10 н. Весом сосуда пренебречь.

△ 6-17. Ящик в форме куба перемещают на некоторое расстояние L : один раз волоком, а другой кантованием (т. е. опрокидыванием через ребро). Коэффициент трения ящика о пол при скольжении равен μ ; трением при кантовании можно пренебречь. При каком μ работы перемещения волоком и кантованием равны?

□ 6-18. Имеются два круглых карандаша разных диаметров ($d_1 > d_2$). Второй карандаш удерживается уравновесить в горизонтальном (или близком к горизонтальному) положении на первом, расположенном горизонтально (рис. 6-9).

а) Уравновесить таким же образом первый карандаш на втором нельзя. Почему?

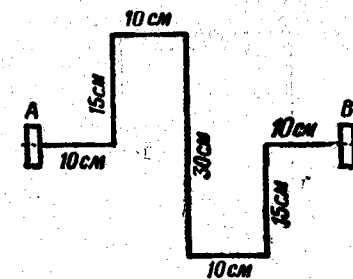


Рис. 6-8.

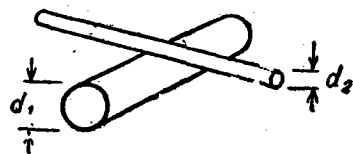


Рис. 6-9.

б) Предположим, что второй карандаш уравновешен в горизонтальном положении. Каково наибольшее значение угла α между направлением оси второго карандаша и горизонтом, при котором он возвращается к горизонтальному положению, если его отпустить? Коэффициент статического трения $\mu=0,5$; отношение диаметров карандашей $\frac{d_1}{d_2}=1,05$.

§ 7. Прочность и упругость материалов

1) Разрушающая сила

$$F = p_m S,$$

где p_m — разрушающее напряжение, S — площадь сечения.

2) Относительное удлинение или сжатие

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{p}{E},$$

где p — напряжение, E — модуль упругости (модуль Юнга).

3) Относительное изменение объема при растяжении

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

где μ — отношение относительного сжатия образца к относительному удлинению.

4) Относительное изменение объема при всестороннем сжатии

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{p}{K},$$

где K — модуль всестороннего сжатия.

5) Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$W = \frac{F \cdot \Delta l}{2},$$

где F — сила упругости при удлинении Δl .

6) Плотность энергии: а) в растянутом или сжатом стержне

$$W = \frac{p^2}{2E};$$

б) во всестороннем сжатом теле

$$W = \frac{p^2}{2K}.$$

7) Угол кручения цилиндра (рис. 7-1)

$$\alpha = \frac{2l}{\pi r^4 G} M,$$

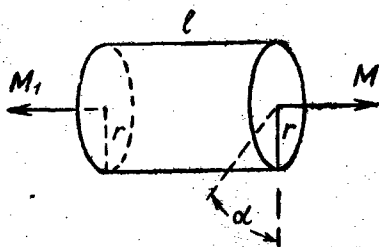


Рис. 7-1.

где M — вращающий момент, вызывающий кручение; l и r — длина и радиус цилиндра; G — модуль сдвига.

О 7-1. Какова наибольшая длина свинцовой проволоки, при которой подвешенная за один конец проволока не оборвется от собственной тяжести?

Δ 7-2. Какое давление изнутри при наружном давлении $0,98 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$ может выдержать:

а) стеклянная трубка, наружный и внутренний диаметры которой равны $d_1=8 \text{ мм}$ и $d_2=7 \text{ мм}$?

б) стеклянная сферическая колба, наружный и внутренний диаметры которой равны $d_1=182 \text{ мм}$ и $d_2=180 \text{ мм}$?

Δ 7-3. Показать, что в котле, состоящем из цилиндрической части (обичайки) и двух полусферических днищ (рис. 7-2), получается одинаковая прочность обичайки и днищ, если сделать днища вдвое более тонкими.

Δ 7-4. Горизонтальный железный стержень длиной $l=150 \text{ см}$ вращается около вертикальной оси, проходящей через его середину.

При какой частоте оборотов он может разорваться?

О 7-5. Стальная проволока диаметром 1 мм имеет длину 5 м , когда на ней висит груз весом 196 н . На сколько удлинится проволока, если груз увеличить еще на 98 н ?

Δ 7-6. Между двумя прочными упорами натянута стальная проволока диаметром 1 мм и длиной 2 м . На сколько сместится середина проволоки, если к ней подвесить груз весом $2,94 \text{ н}$. При расчете принять, что упоры при навешивании груза не смещаются.

Δ 7-7. Медный стержень длиной 2 м и диаметром 3 см переводится из горизонтального положения в вертикальное и опирается на пол. При этом диаметр его нижней части становится чуть-чуть больше. Можно ли измерить это изменение, если воспользоваться прибором, позволяющим измерять с точностью до $0,001 \text{ мм}$?

Δ 7-8. Длинная железная труба имеет внутренний диаметр $d=30 \text{ см}$ и толщину стенок $b=0,5 \text{ см}$. На сколько увеличится площадь сечения канала трубы, если разность давления внутри и вне трубы увеличится от нуля до $p=4,9 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$? Изменением толщины стенок при растяжении пренебречь.

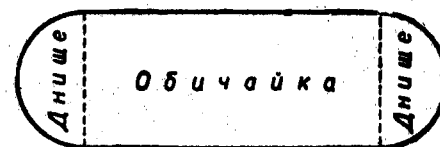


Рис. 7-2.

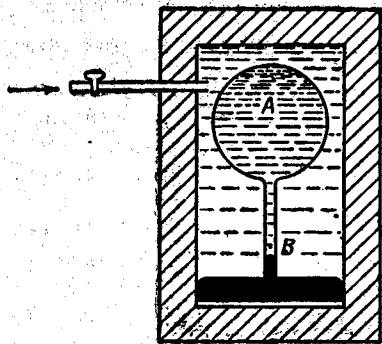


Рис. 7-3.

○ 7-9. На какой глубине плотность пресной воды на 1% больше плотности вблизи свободной поверхности?

△ 7-10. Труба, описанная в задаче 7-8, имеет длину 200 м и расположена горизонтально. Концы трубы перекрыты. Труба заполнена водой, причем разность давлений воды и наружного воздуха равна $4,9 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$.

Какой объем воды вытечет из трубы, если по верхней линии ее стенки образуется трещина?

△ 7-11. На рисунке 7-3 изображен пьезометр — прибор для измерения модуля сжатия жидкостей. При увеличении давления жидкости, окружающей стеклянный сосуд А, ртуть в колене В поднимается. Как измерить модуль всестороннего сжатия жидкости, находящейся внутри сосуда А? Какова относительная погрешность, которая будет иметь место, если не принять во внимание сжатия стекла под действием всестороннего давления, а модуль всестороннего сжатия исследуемой жидкости близок к $3 \cdot 10^9 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$?

△ 7-12. Стальной маховик вращается с частотой оборотов $n = 30 \text{ мин}^{-1}$. Средний диаметр его обода равен $d = 1,5 \text{ м}$. Определить увеличение диаметра маховика, пренебрегая действием спиц.

△ 7-13. К двум противоположным граням однородного кубика приложены две равные противоположно направленные растягивающие силы. Если эти грани удаляются друг от друга на расстояние Δl , то четыре другие грани сближаются на расстояние $\mu \Delta l$. Предположим, что силы, действующие на две первые грани, исчезли, а на четыре остальные грани действуют попарно равные сжимающие силы, такие, что эти грани остаются на прежнем расстоянии (т. е. сближены на $\mu \Delta l$). Останется ли форма кубика такой, какой она была при наличии двух растягивающих сил?

○ 7-14. Стальная проволока длиной $l = 4 \text{ м}$ и диаметром $d = 2 \text{ мм}$ растягивается силой $F = 9,8 \cdot 10^2 \text{ н}$. На сколько изменится при этом: а) ее объем? б) ее боковая поверхность?

○ 7-15. Определить энергию, зависящую от наличия напряжения в проволоке, описанной в задаче 7-5, при действии силы 294 н.

○ 7-16. Определить плотность энергии, зависящей от сжатия, в пресной воде на глубине 1,5 км.

○ 7-17. Определить плотность энергии в проволоке, описанной в задаче 7-6.

○ 8-22. Начальная амплитуда колебания маятника равна 3 см. Через 10 сек она равна 1 см. Через сколько времени амплитуда колебаний будет равна 0,3 см?

○ 8-23. Три последовательных крайних положения качающейся стрелки гальванометра пришлись против делений $n_1 = 20,0$; $n_2 = 5,6$ и $n_3 = 12,8$. Считая декремент затухания постоянным, определить деление, соответствующее положению равновесия стрелки.

△ 8-24. Каков логарифмический декремент затухания маятника длиной 0,8 м, если его начальная амплитуда 5° , а через 5 мин амплитуда равна $0,5^\circ$?

○ 8-25. Через сколько времени энергия колебаний камертона с частотой $f = 600 \text{ гц}$ уменьшится в $n = 10^6$ раз, если логарифмический декремент затухания равен 0,0008?

△ 8-26. Какова общая сумма путей, пройденных взад и вперед колеблющейся точкой до полного затухания колебаний, если амплитуда первого колебания равна 1 мм, а логарифмический декремент затухания равен 0,002?

△ 8-27. Амплитуда затухающих колебаний уменьшается в течение одного периода в 3 раза.

а) На сколько процентов период колебания больше, чем при отсутствии причины, вызывающей затухание?

б) При каком фазовом угле смещение максимально?

в) При каком фазовом угле скорость максимальна?

г) Начертить приблизительно график смещения и скорости этих колебаний.

□ 8-28. а) Упругое тело колеблется в сопротивляющейся среде, причем логарифмический декремент затухания равен 0,7. Возможны ли затухающие колебания этого тела в среде, коэффициент сопротивления которой в 10 раз больше, чем у данной среды?

б) Тот же вопрос, если декремент в данной среде равен 0,6; 0,1.

в) Если колебания в более вязкой среде возможны, то каковы их декременты затухания?

○ 8-29. При какой скорости поезда рессоры его вагонов будут особенно сильно колебаться под действием толчков колес о стыки рельс, если длина рельс 12,5 м, нагрузка на рессору равна 5,5 кн и если рессора прогибается на 16 мм при нагрузке в 1 кн?

△ 8-30. Амплитуды скорости вынужденных колебаний при частотах вынуждающей силы, равных $f_1 = 200 \text{ гц}$ и $f_2 = 300 \text{ гц}$, равны между собой. Принимая, что амплитуда вынуждающей силы в обоих случаях одна и та же, найти частоту, соответствующую резонансу скорости.

△ 8-31. Амплитуды смещений вынужденных колебаний при частотах вынуждающей силы, равных $f_1 = 200 \text{ гц}$ и $f_2 = 300 \text{ гц}$, равны между собой. Найти частоту, соответствующую резонансу смещений.

△ 8-32. На графике зависимости амплитуды скоростей от частоты вынуждающей силы провели прямую, параллельную оси абсцисс, на высоте, равной половине максимума. Отрезок этой прямой между точками пересечения с графиком соответствует $\Delta f = 20$ гц. Определить коэффициент затухания.

△ 8-33. Амплитуда смещения вынужденных колебаний при очень малой частоте равна $s_0 = 2$ мм, а при резонансе равна $s = 16$ мм. Предполагая, что декремент затухания меньше единицы, определить его.

□ 8-34. Стальная струна протянута между полюсами электромагнита, по обмотке которого идет переменный ток, вследствие чего струна колеблется с частотой переменного тока. Натяжение струны постепенно увеличивают. Когда частота собственных колебаний струны равна 100 гц, мощность тока в обмотке достигает максимальной величины и на 50% превышает мощность, потребляемую электромагнитом при отсутствии струны. Когда частота собственных колебаний струны увеличивается до 101 гц, то мощность тока в обмотке электромагнита только на 5% превышает мощность при отсутствии струны. В течение какого отрезка времени τ амплитуда колебаний струны уменьшится в 10 раз, если ток в обмотке электромагнита выключить?

△ 8-35. Маятник стальных часов массой 40 г совершает колебания с периодом 0,4 сек, причем его центр инерции колеблется с амплитудой 7 мм. Если часы не заведены, то амплитуда колебания уменьшается в 2 раза за 3 колебания. Определить полезную работу, которая производится при заводе часов на недельный срок.

□ 8-36. Определить период колебания маятника, угол отклонения которого равен 90° .

Указание. Использовать закон сохранения энергии для определения скорости движения в каждой точке траектории, интеграл вычислить приближенно.

§ 9. Движение жидкостей и газов

1) В поле тяготения с напряженностью g скорость истечения жидкости из малого отверстия в открытом сосуде равна

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

где h — глубина отверстия относительно уровня жидкости в сосуде.

2) Для установившегося течения жидкости (несжимаемой и без трения) верна теорема Бернулли

$$p + \frac{Dv^2}{2} + Dgh = \text{const},$$

где p — давление; D — плотность жидкости; v — скорость течения.

3) Если движение среды, обтекающей твердое тело, перемещающееся внутри нее с постоянной скоростью v , является ламинарным, то лобовое сопротивление выражается формулой

$$F = -k\eta bv.$$

Здесь η — вязкость среды; b — величина, характеризующая линейные размеры тела; k — безразмерная величина, зависящая от формы тел и одинаковая для всех геометрически подобных тел. Знак минус указывает, что F направлено противоположно v . В случае шара, если принять b равным радиусу шара r , $k = 6\pi$, F выражается формулой Стокса

$$F = -6\pi\eta rv.$$

4) При ламинарном течении жидкости по круглой трубе с внутренним радиусом r объем жидкости, протекающей за время t , равен

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

где Δp есть разность давлений между точками, отстоящими по оси трубы на расстоянии l (формула Пуазейля).

5) Если движение среды, обтекающей твердое тело, является турбулентным, формула п. 3) неприменима. В этом случае при не слишком больших скоростях лобовое сопротивление можно вычислять по формуле

$$F = -C_x S v^2 D.$$

Здесь S — площадь миделя, т. е. наибольшая площадь сечения тела в направлении, перпендикулярном к скорости v ; D — плотность среды; C_x — безразмерный коэффициент, зависящий от формы тела. Направление нормали к площади миделя считается совпадающим с вектором скорости тела.

6) Характер движения среды определяется безразмерным числом Рейнольдса, $Re = \frac{bvD}{\eta}$, где b — величина, характеризующая линейные размеры потока среды. При малых значениях Re движение среды является ламинарным, при больших — турбулентным. В случае шара переход от ламинарного движения к турбулентному происходит при значениях Re , близких к 0,5, если при вычислении Re в качестве b взять диаметр шара. При увеличении скорости течения жидкости по трубе переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при Re , близком к 3000, если в качестве b взять диаметр трубы.

7) При решении первых 9 задач этого параграфа принимать, что вязкость среды и ее сжимаемость ничтожно малы.

О 9-1. В середине дна цилиндрического ведра имеется небольшое отверстие, сквозь которое вытекает вода. Уровень воды

в ведре на 30 см выше дна. С какой скоростью вытекает вода сквозь отверстие в следующих случаях: а) ведро неподвижно; б) ведро равномерно поднимается; в) ведро движется с ускорением $120 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$ сначала вверх, затем вниз; г) ведро висит на веревке и качается, причем угол, образуемый веревкой с вертикалью, достигает 60° . Рассмотреть случаи крайнего и среднего положений ведра.

○ 9-2. В чан равномерной струей наливается вода. Приток воды равен $150 \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$. В дне чана имеется отверстие площадью $0,5 \text{ см}^2$. Какого уровня может достигнуть вода в чане?

○ 9-3. На горизонтальном столе стоит сосуд, в вертикальной стенке которого сделано несколько отверстий одно над другим. Сосуд наполнен водой и из отверстий бьют струи.

а) Показать, что все струи бьют о стол с одинаковыми скоростями.

б) Показать, что две струи бьют в одну и ту же точку стола, если расстояния одного из отверстий от уровня жидкости в сосуде и другого от поверхности стола одинаковы.

в) В каком месте стенки сосуда надо сделать отверстие, чтобы струя из него била в поверхность стола возможно дальше от сосуда?

△ 9-4. Цилиндрический сосуд высотой 70 см с площадью дна 600 см^2 наполнен водой. В дне сосуда образовалось отверстие площадью 1 см^2 .

а) Как движется верхний уровень воды в сосуде?

б) Сколько времени понадобится для полного опорожнения сосуда?

в) Сколько времени понадобится для опорожнения сосуда наполовину?

г) Увеличится или уменьшится время опорожнения сосуда, если сосуд будет совершать гармонические колебания в вертикальном направлении?

○ 9-5. а) Показать, что в схеме на рисунке 9-1 работа при перемещении правого поршня больше работы при перемещении левого поршня.

б) За счет чего производится дополнительная работа при использовании схемы как механизма для увеличения силы?

○ 9-6. Площадь поршня в спринцовке (рис. 9-2) $S_1 = 1,2 \text{ см}^2$, а площадь отверстия $S_2 = 1 \text{ мм}^2$. Сколько времени будет выте-



Рис. 9-1.



Рис. 9-2.

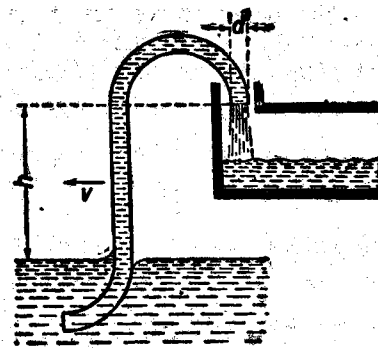


Рис. 9-3.

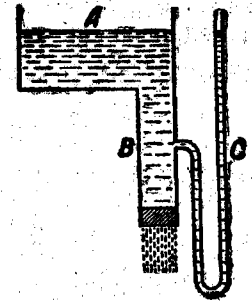


Рис. 9-4.

кать вода из спринцовки, если действовать на поршень силой $F = 5 \text{ н}$ и если ход поршня $l = 4 \text{ см}$?

△ 9-7. Чтобы избежать необходимости остановки поезда для пополнения запаса воды в паровозе, иногда употребляют следующий способ. Между рельсами устраивают длинную канаву, наполненную водой. В эту канаву с паровоза опускают трубу, изогнутую, как показано на рисунке 9-3. Вода в трубе поднимается и переливается в бак, установленный на паровозе. Почему это происходит? С какой скоростью v должен двигаться поезд, чтобы вода поднималась на высоту $h = 3,5 \text{ м}$ и чтобы за промежуток времени, в течение которого поезд пройдет путь $l = 1 \text{ км}$, в бак подавалось 3 м^3 воды? Диаметр трубы $d = 10 \text{ см}$.

○ 9-8. Очень широкий цилиндрический сосуд A имеет в дне отверстие, снабженное вертикальной трубкой B . К трубке присоединен манометр C (рис. 9-4). Нижний конец трубки закрыт пробкой, и уровни жидкости в сосуде и манометре одинаковы.

а) Как расположится уровень в манометре, если, вынув пробку, дать жидкости вытекать? Внутреннее трение предполагается ничтожно малым.

б) Как изменится ответ, если трубка B сужается книзу?

○ 9-9. Из брандспойта бьет струя воды, дающая 60 л за 1 мин . Площадь отверстия в брандспойте $1,5 \text{ см}^2$. На сколько больше атмосферного давления давление внутри шланга в том месте, которое на 3 м ниже конца брандспойта? Площадь канала шланга 10 см^2 .

△ 9-10. Для измерения количества газа, протекающего по газопроводу, употребляют прибор, устройство которого схематически показано на рисунке 9-5. О скорости протекания газа судят по разности давлений в точках A и B прибора. Определить массу газа, протекшего за час при таких условиях: внутренний диаметр газопровода $d_1 = 50 \text{ мм}$; внутренний диаметр наиболее узкой части трубки $d_2 = 40 \text{ мм}$; разность давлений

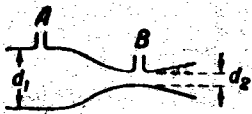


Рис. 9-5.

в точках A и B равна $p = 12 \text{ мм вод. ст.}$, плотность газа $D = 0,0014 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. При расчете пренебречь трением и изменением плотности газа при уменьшении давления.

○ 9-11. В восходящем потоке воздуха, скорость которого равна $2 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, находится

пылинка, имеющая форму шарика диаметром $0,01 \text{ мм}$. Опускается или поднимается пылинка, если ее плотность на $2,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ больше плотности воздуха? Принять, что движение воздуха при обтекании пылинки является ламинарным.

△ 9-12. В высокий сосуд, наполненный касторовым маслом при 20°C , бросают маленькие свинцовые шарики разных диаметров. Опустившись на некоторую глубину, шарики движутся равномерно, так как действующие на них силы уравниваются.

а) Определить число Рейнольдса для движения шарика диаметром $0,1 \text{ мм}$, предполагая, что движение масла при опускании шарика является ламинарным. Выяснить, является ли это предположение правильным.

б) Каков максимальный диаметр шарика, если при опускании шарика движение масла остается ламинарным?

□ 9-13. Показать, что коэффициент C_x в формуле для лобового сопротивления при турбулентном движении равен отношению количества движения, передаваемого телу потоком, к тому количеству движения, которое передавал бы телу за то же время поток с площадью сечения, равной площади мидела, если бы после встречи с телом он двигался по направлению, перпендикулярному к скорости, которую имел до встречи.

○ 9-14. Грузовой автомобиль движется со скоростью $6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Какова мощность по преодолению сопротивления воздуха, если движение является турбулентным? Площадь мидела автомобиля $3,75 \text{ м}^2$. Принять $C_x = 0,6$ и плотность воздуха $1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

△ 9-15. Свинцовая пуля в виде шарика диаметром 5 мм движется в воздухе со скоростью $300 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. а) Принимая плотность воздуха равной $0,0012 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, определить число Рейнольдса. б) С каким ускорением движется при этой скорости пуля (массой вытесненного воздуха и наличием поля тяготения пренебречь). Принять, что для шара $C_x = 0,25$.

○ 9-16. а) Какова максимальная скорость течения воды при температуре 15°C по трубе с внутренним диаметром 2 см , при которой течение еще остается ламинарным?

б) Какова при такой скорости разность давлений между двумя точками внутри трубы, расстояние между которыми равно 200 м ?

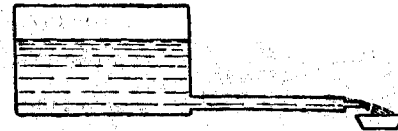


Рис. 9-6.

△ 9-17. Широкий сосуд снабжен внизу горизонтальной капиллярной трубкой, состоящей из двух звеньев (рис. 9-6). Первое звено имеет длину 20 см и внутренний диаметр 1 мм , второе имеет длину 2 см и внутренний диаметр $0,5 \text{ мм}$. В сосуд налит глицерин, уровень которого на 10 см выше капилляра. Какой объем глицерина вытекает из капилляра за 1 мин ?

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

§ 10. Расширение при нагревании твердых и жидких тел

1) Изменение длины и объема при изменении температуры на Δt

$$\Delta l = l - l_0 = \alpha l_0 \Delta t; \quad \Delta V = V - V_0 = \beta V_0 \Delta t,$$

где l_0 — начальная длина; V_0 — начальный объем; α и β — коэффициенты линейного и объемного расширения, относящиеся к телам, внутри которых отсутствует напряжение.

2) Для твердых изотропных тел $\beta = 3\alpha$.

3) Плотность при температуре t

$$D_t = \frac{D_0}{1 + \beta t},$$

где D_0 — плотность при 0°C .

○ 10-1. Два бруска разного объема из одного и того же материала, имеющие разную температуру, прикладываются друг к другу гранями, причем более теплый передает некоторое количество теплоты другому. Обмен теплотой с окружающими телами отсутствует. Изменяется ли при этом общий объем и общая длина брусков?

○ 10-2. Можно ли заметить тепловое расширение диаметра латунного цилиндра, если измерение производится микрометром с точностью до $0,01 \text{ мм}$ при температурах 5 и 35°C ? При 5°C измерение дало $20,45 \text{ мм}$.

○ 10-3. При 0°C цинковый стержень имеет длину 200 мм , а медный 201 мм . Поперечные размеры их при 0°C одинаковы.

а) При какой температуре их длины одинаковы?

б) При какой температуре их объемы одинаковы?

△ 10-4. Два стержня одинаковой длины (рис. 10-1) AB и AC , сделанные из металла с коэффициентом расширения α_1 , соединены шарнирами в точках A , B и C между собой и со стерж-

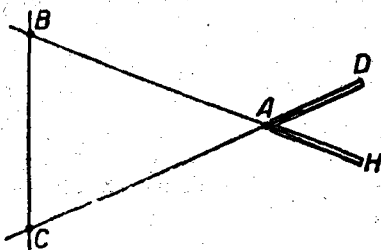


Рис. 10-1.

нем BC , сделанным из металла с коэффициентом линейного расширения α_2 . На концы стержней надеты, как показано на рисунке 10-1, трубки AD и AH одинаковой длины, сделанные из того же металла, что и стержень BC . Каково должно быть отношение между α_1 и α_2 , если требуется, чтобы расстояние DH при изменении температуры оставалось постоянным?

○ 10-5. Холодный металлический шар опущен в горячую воду, а такой же горячий шар опущен в холодную воду. Каковы деформации наружных и внутренних слоев шаров?

△ 10-6. Часы с латунным маятником идут правильно при 0°C . На сколько отстанут часы за сутки, если температура повысится до $t = +20^\circ \text{C}$?

○ 10-7. Как изменится угловая скорость тела, вращающегося без трения вокруг некоторой оси, если температура повысится от 0 до $t^\circ \text{C}$? Как изменится при этом кинетическая энергия тела? За счет чего произойдет изменение энергии?

○ 10-8. Сообщающиеся сосуды наполнены жидкостью. Температура жидкости в одном из них повышается, в другом остается неизменной. Меняется ли при этом уровень жидкости во втором сосуде?

○ 10-9. При какой температуре плотность ртути равна $13,48 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, если при 10°C она равна $13,57 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$?

△ 10-10. Стекланный сосуд весит $P_0 = 53 \text{ гс}$. Тот же сосуд, наполненный ртутью, при 0°C весит $P_1 = 1384 \text{ гс}$. Когда этот сосуд нагрели до $t = 40^\circ \text{C}$, то часть ртути вытекла и сосуд стал весить $P_2 = 1376 \text{ гс}$. Каков коэффициент объемного расширения стекла β_2 ?

△ 10-11. При отсчете показания барометра обычно делают поправку на расширение шкалы и изменение плотности ртути по сравнению с 0°C . Каково было бы показание барометра при 0°C , если при 30°C оно равно $758,2 \text{ мм}$? Шкала барометра латунная.

△ 10-12. Ртутный термометр со стеклянной шкалой, установленный на паропроводе, частично утоплен в изоляции паропровода так, что снаружи видны деления шкалы выше 27°C . Резервуар термометра соприкасается с паром и имеет его температуру. Температура воздуха в помещении 30°C . Принимая во внимание, что термометр градуирован в условиях, обеспечивающих одинаковость температуры по всей длине термометра, определить температуру пара, если термометр показывает 170°C .

§ 11. Свойства идеальных газов

1) Характеристическое уравнение для идеальных газов (уравнение Клапейрона—Менделеева)

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



Рис. 11-1.

или

$$p v_{\mu} = R T,$$

где p — давление; V — общий и v — удельный объемы газа; m — масса газа, μ — молекулярный вес; T — абсолютная температура газа; R — универсальная газовая постоянная.

2) Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений газов, составляющих смесь.

3) Барометрическая формула

$$h = \frac{R T}{\mu g} \ln \frac{p_0}{p}.$$

4) При решении задач принимать, что абсолютное давление газов в баллонах на $9,8 \cdot 10^4 \frac{\text{н}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ больше показания манометров. В первых 5 задачах считать температуру постоянной.

Δ 11-1. Сколько качаний надо сделать, чтобы при помощи насоса, захватывающего при каждом качании 40 см^3 воздуха, наполнить пустую камеру шины велосипеда настолько, чтобы площадь ее соприкосновения с дорогой была равна 60 см^2 ? Нагрузка на колесо равно 350 н . Объем камеры равен 2000 см^3 .

Давление атмосферы принять равным $10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$. Жесткостью по крышки камеры пренебречь.

Δ 11-2. В чашечный ртутный барометр попал пузырек воздуха, вследствие чего барометр показывает давление меньше истинного. При сверке его с точным барометром оказалось, что при давлении 768 мм рт. ст. барометр показывает 748 мм рт. ст. , причем расстояние от уровня ртути до верхнего основания трубки равно 80 мм .

Каково истинное давление, если барометр показывает 734 мм рт. ст. (температура воздуха та же)?

Δ 11-3. В запаянной с одного конца стеклянной трубке, длина которой 70 см , находится столбик воздуха, запертый сверху столбиком ртути высотой 20 см , доходящим до верхнего края трубки (рис. 11-1). Трубку осторожно перевертывают, причем часть ртути выливается.

а) Какова высота x столбика ртути, который останется в трубке, если атмосферное давление соответствует давлению столба ртути высотой 75 см ?

б) При какой длине трубки столбик ртути той же высоты выльется из трубки полностью?

Δ 11-4. На рисунке 11-2 изображен манометр для малых давлений. Трубка C соединяет прибор с испытуемым резервуаром. При поднимании сосуда A находящаяся в нем ртуть доходит до сосуда D , разобщая при этом находящийся в нем газ с

испытуемым резервуаром. При дальнейшем поднятии ртуть входит в одинаковые капилляры K_1 и K_2 . Каково давление газа в испытуемом сосуде при таких данных: объем сосуда D равен 130 см^3 ; внутренний диаметр капилляра равен $1,1 \text{ мм}$; разность уровней в капиллярах 23 мм ; уровень ртути в капилляре K_2 совпадает с концом капилляра K_1 ?

Δ 11-5. На рисунке 11-3 изображен прибор для измерения объемов — волюметр. На нем произведены такие измерения.

1) Открыв кран K , соединили трубку AB и сосуд Z с атмосферным воздухом. Затем трубка C была приведена в такое положение, что ртуть стояла на уровне l .

2) Закрыв кран K , медленно подняли трубку C настолько, что ртуть достигла уровня n . Отсчитали разность уровней ртути в трубках C и B : $h_1 = 18,5 \text{ см}$.

3) Открыв кран K , в сосуд Z поместили $m = 72 \text{ г}$ зерен ржи. Установили ртуть на уровне l и снова закрыли кран K .

4) Подняли трубку C настолько, что ртуть поднялась до уровня n , измерили разность уровней ртути в трубках $h_2 = 30,5 \text{ см}$.

Определить на основании этих измерений плотность D зерен ржи, если известно, что внутренний объем сосуда вместе с объемом канала трубки до черты n равен $V = 152 \text{ см}^3$.

○ 11-6. Манометр на баллоне со сжатым газом при температуре 18°C показывает давление $8,4 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$.

Какое давление он будет показывать, если температура понизится до -23°C ? Изменением емкости баллона вследствие охлаждения пренебречь.

○ 11-7. Газ при давлении 745 мм рт. ст. и при температуре 20°C имеет объем 164 см^3 . Каков объем той же массы газа при нормальных условиях?

Δ 11-8. Компрессор захватывает при каждом качании 4 л воздуха при атмосферном давлении и температуре -3°C и нагнетает его в резервуар емкостью $1,5 \text{ м}^3$, причем температура воздуха в резервуаре держится около 45°C . Сколько качаний должен сделать компрессор, чтобы давление в резервуаре увеличилось на $2 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$.

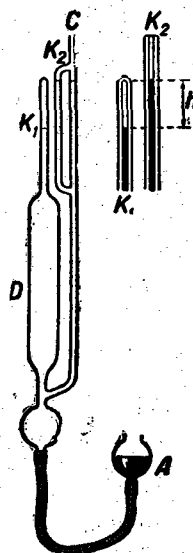


Рис. 11-2.

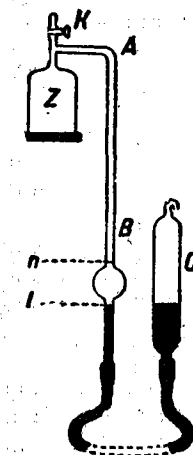


Рис. 11-3.

Δ 11-9. Баллон емкостью 20 л наполнен сжатым воздухом. При температуре 20°C манометр показывает давление $1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Какой объем воды можно вытеснить из цистерны подводной лодки воздухом этого баллона, если вытеснение производится на глубине 30 м и температура равна 5°C? Принять, что давление столба воды высотой 10 м равно $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; давление атмосферы принять равным $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

○ 11-10. Определить давление 4 кг кислорода, заключенного в сосуд емкостью 2 м³, при температуре 29°C.

○ 11-11. Определить удельный объем азота при температуре 27°C и давлении $4,9 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

○ 11-12. Определить массу кислорода, заключенного в баллоне емкостью 10 л, если при температуре -13°C манометр на баллоне показывает давление $8,8 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

○ 11-13. Из баллона со сжатым водородом емкостью 10 л вследствие неисправности вентиля утекает газ. При температуре 7°C манометр показывал $4,9 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Через некоторое время при температуре 17°C манометр показал такое же давление. Сколько утекло газа?

Δ 11-14. По газопроводной трубе идет углекислый газ при давлении $p = 3,9 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ и температуре $t = 7^\circ\text{C}$. Какова скорость движения газа в трубе, если за $\tau = 10$ мин протекает $m = 2$ кг углекислого газа и если площадь сечения канала трубы $S = 5 \text{ см}^2$?

Δ 11-15. По трубе диаметром 3 см течет воздух, давление которого равно 50 ат, а температура 0°C. При какой скорости течение воздуха превратится из ламинарного в турбулентное?

Примечание. Вязкость газов практически не зависит от давления.

Δ 11-16. При начале подъема стратостата его оболочка наполнена водородом лишь на $\frac{1}{8} - \frac{1}{10}$ полного объема. При поднятии оболочка сначала раздувается. Затем объем стратостата перестает увеличиваться, и водород начинает вытекать из него сквозь аппендикс. При этом давление и температура водорода внутри стратостата и воздуха снаружи стратостата продолжают оставаться приблизительно равными между собой.

а) Показать, что при отсутствии вытекания водорода подъемная сила стратостата остается неизменной, а при вытекании водорода постепенно уменьшается.

б) Сколько водорода вытекло из стратостата, если при неизменном объеме баллона подъемная сила уменьшилась на $2,64 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$?

Δ 11-17. Предположим, что температура воздуха в атмосфере зависит от высоты таким образом, что плотность воздуха по всей толще атмосферы одинакова. На каком расстоянии по вертикали разность температур равна 1°C?

□ 11-18. В вертикальном закрытом сверху и снизу цилиндре находится движущийся с ничтожным трением поршень. Над и под поршнем находятся одинаковые массы одного и того же газа при температуре $T_1 = 300^\circ\text{C}$. Вес поршня уравнивается разностью сил давлений газа, если объем нижней части цилиндра в $n = 3$ раза меньше объема верхней части. Каково будет соотношение объемов, если температура повысится до $T_2 = 400^\circ\text{C}$?

○ 11-19. Три баллона емкостью 3, 7 и 5 л наполнены соответственно кислородом (2 ат), азотом (3 ат) и углекислым газом (0,6 ат) при одной и той же температуре. Баллоны соединяют между собой, причем образуется смесь той же температуры. Каково давление смеси?

Δ 11-20. Определить молекулярный вес газа, свойства которого соответствуют свойствам смеси 160 г кислорода и 120 г азота.

Δ 11-21. Определить плотность смеси 4 г водорода и 32 г кислорода при температуре 7°C и при давлении 700 мм рт. ст.

Δ 11-22. Топочный газ имеет следующий состав по весу: $\text{CO}_2 - 21,4\%$, $\text{H}_2\text{O} - 6,8\%$, $\text{N}_2 - 71,8\%$. Определить удельный объем такого газа при давлении $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ и при температуре 500°C.

○ 11-23. Давление воздуха на уровне моря $p_0 = 750$ мм рт. ст., а на вершине горы 590 мм рт. ст. Какова высота горы, если температура воздуха равна $t = 5^\circ\text{C}$?

Δ 11-24. Предположим, что внутри вертикальной трубы высотой 100 м находится воздух при температуре 500°C; снаружи труба окружена воздухом при температуре 250°C. Труба сверху открыта, а внизу отделена от наружного воздуха заслонкой площадью 300 см². Какая сила действует на заслонку, если давление воздуха у верхнего конца трубы равно 740 мм рт. ст.?

□ 11-25. Трубка длиной 22 см вращается около вертикальной оси, проходящей сквозь ее середину, с частотой оборотов, равной 30 сек⁻¹. Температура воздуха 16°C. Принимая давление воздуха внутри трубки вблизи ее открытых концов равным атмосферному (760 мм рт. ст.), определить давление в середине трубки.

§ 12. Первый принцип термодинамики в применении к идеальным газам

1) Первый принцип термодинамики

$$dU = -pdV + dQ,$$

где dU — изменение внутренней энергии газа; pdV — работа против внешнего давления; dQ — количество притекающей теплоты.

2) Удельные теплоемкости идеальных газов зависят от природы газа (от молекулярного веса) и от характера процесса, при котором газ поглощает теплоту. При некоторых процессах (см. задачу 12-22) удельные теплоемкости газов зависят, кроме того, от температуры. Удельные теплоемкости при изохорическом и изобарическом процессах c_v и c_p не зависят от температуры.

3) Внутренняя энергия идеального газа

$$U = c_v m T = \frac{pV}{\kappa - 1}, \quad \text{где } \kappa = \frac{c_p}{c_v}.$$

4) Связь между удельными теплоемкостями идеального газа

$$c_p = c_v + \frac{R}{\mu}.$$

5) Работа при изотермическом процессе

$$A = Q = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

6) Уравнение адиабатного процесса

$$pV^\kappa = \text{const}.$$

О 12-1. Принимая отношение теплоемкостей для двухатомных газов равным $\kappa = 1,4$, вычислить удельные теплоемкости: а) кислорода; б) азота.

О 12-2. Вычислить отношение $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ для смеси 3 молей аргона и 5 молей кислорода.

О 12-3. Баллон емкостью 10 л с кислородом при давлении $80 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и при температуре 7°C нагревается до $15,5^\circ \text{C}$. Какое количество теплоты при этом поглощается газом?

Δ 12-4. Сосуд, содержащий некоторое количество азота при температуре $t_1 = 15^\circ \text{C}$, движется со скоростью $v = 100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

Какова будет температура t_2 газа в сосуде, если он внезапно остановится и если передачей теплоты стенкам можно пренебречь?

О 12-5. В комнате размером 90 м^3 воздух сменяется полностью через 2 ч. Какое количество теплоты требуется для обогрева воздуха в комнате за сутки, если температура воздуха в комнате должна быть 18°C , а наружный воздух имеет температуру -5°C ? Принять, что средняя плотность воздуха $1,25 \frac{\text{г}}{\text{л}}$.

Δ 12-6. Турбогенератор мощностью 3000 квт охлаждается проточным воздухом. Какие объемы воздуха должны входить в генератор и выходить из него в течение 1 сек, если коэффициент полезного действия генератора равен 94%, температура воздуха, выходящего из генератора, не должна превышать 50°C , температура в машинном зале 20°C , давление воздуха 750 мм рт.ст. ?

Δ 12-7. В цилиндре керосинового двигателя происходит быстрое сгорание горючей смеси. Какая температура t_2 и какое давление p_2 получатся при сгорании, если объем камеры сгорания $V = 10 \text{ л}$; давление перед сгоранием $p_1 = 5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

температура $t_1 = 210^\circ \text{C}$; количество керосина в смеси $m = 0,9 \text{ г}$; теплоемкость продуктов сгорания $c_v = 0,17 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$; средний молекулярный вес горючей

смеси $\mu = 29,4 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$; калорийность керосина.

$10\,000 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$?



Рис. 12-1.

Указание. Рассчитывать нагревание при сгорании, как изохорный процесс, пренебрегая изменением объема за время сгорания.

О 12-8. 200 г азота нагреваются при постоянном давлении от 20 до 100°C . Какое количество теплоты поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии газа? Какую внешнюю работу производит давление газа?

Δ 12-9. В цилиндре под поршнем находится в замкнутом пространстве воздух (рис. 12-1). Какая работа должна быть произведена, чтобы поднять поршень на высоту $h_1 = 10 \text{ см}$, если начальная высота столба воздуха равна $h_0 = 15 \text{ см}$ и если наружное давление равно $p_0 = 760 \text{ мм рт.ст.}$? Площадь поршня $S = 10 \text{ см}^2$. Весом поршня можно пренебречь. Температура остается неизменной.

Δ 12-10. а) Некоторая масса азота при давлении 1 ат имела объем 5 л , а при давлении 3 ат — объем 2 л . Переход от первого состояния ко второму был сделан в два этапа: сначала по изохоре, затем по изобаре. Определить изменение внутренней энергии, количество теплоты и произведенную работу.

б) Произвести те же расчеты в случае обратного порядка этапов: сначала по изобаре, затем по изохоре. Почему результаты расчетов в случаях а) и б) различны?

Δ 12-11. Производится сжатие некоторой массы двухатомного газа ($\kappa = 1,4$) один раз изотермически, другой раз адиабатно. Начальные температура и давление сжимаемого газа оба раза одинаковы. Конечное давление в n раз больше начального. Найти отношение работ сжатия при адиабатном и изотермическом процессах. Рассмотреть случаи: а) $n = 2$; б) $n = 100$.

О 12-12. Прибор, изображенный на рисунке 12-2 (воздушное огниво), служит для демонстрирования нагревания воздуха при адиабатном сжатии. Определить температуру воздуха в



огниве при быстром уменьшении объема в 10 раз, если начальная температура 15°C .

Δ 12-13. Некоторая масса сухого воздуха поднимается в атмосфере в широком потоке такого же воздуха; теплообмен этой массы с внешними телами практически отсутствует. Каково изменение температуры воздуха (Δt) при подъеме на высоту $\Delta h = 500 \text{ м}$?

Указание. При расчете надо принять во внимание, что при подъеме воздуха за счет внутренней энергии увеличивается его потенциальная энергия и производится работа расширения.

Δ 12-14. В четырехтактном двигателе Дизеля засосанный атмосферный воздух в объеме 10 л подвергается 12-кратному сжатию. Предполагая процесс сжатия адиабатным, определить конечное давление, конечную температуру и работу сжатия, если начальное давление и температура равны 1 ат и 10°C .

Δ 12-15. а) Начальные и конечные состояния некоторой массы азота такие же, как и в задаче 12-10. Переход от первого состояния ко второму был произведен тоже в два этапа: сначала по адиабате, затем по изохоре. Определить изменение внутренней энергии, количество теплоты и произведенную работу.

б) Произвести те же расчеты при обратном порядке этапов перехода.

□ 12-16. В цилиндре, закрытом с обоих концов и наполненном воздухом, находится поршень, разделяющий пространство в цилиндре на две равные части (рис. 12-3). Давление воздуха на обе стороны поршня равно $p_0 = 1 \text{ ат}$. Поршень отклоняется от положения равновесия на незначительное расстояние и начинает колебаться, причем процессы в газе можно считать адиабатными. Определить период этих колебаний, если масса поршня равна $m = 1,5 \text{ кг}$; расстояние от поршня до стенки равно $l = 20 \text{ см}$ и площадь поршня $S = 100 \text{ см}^2$. Трение ничтожно мало.

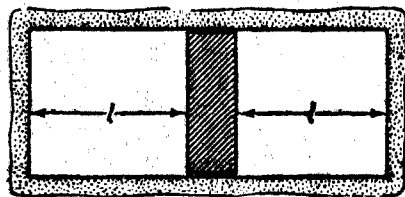


Рис. 12-3.

О 12-17. Начертить примерные графики изохорического, изобарического, адиабатного и изотермического процессов на диаграммах: а) T, p ; б) T, V ; в) T, U и г) V, U .

Δ 12-18. Баллоны со стенками из непроводящих теплоту материалов, объемы которых равны V_1 и V_2 , содержат два газа, имеющих давления p_1 и p_2 и температуры T_1 и T_2 .

Баллоны соединены трубкой с краном. Кран открывается, происходит перемешивание газов, и устанавливается общее давление p и общая температура T . Отношение теплоемкостей при изобарическом и при изохорическом процессах для обоих газов одно и то же. Определить p и T .

Δ 12-19. На рисунке 12-4 показана «теоретическая» диаграмма работы компрессора двойного действия (при опытных исследованиях получаются закругленные углы). Часть AB соответствует изотермическому сжатию воздуха; BC — проталкиванию воздуха в резервуар (давление остается постоянным); CD — мгновенному уменьшению давления в цилиндре компрессора при закрытии выпускного клапана и открытии впускного; DA — впуску воздуха при давлении одной атмосферы. Показать, что работа компрессора за 1 оборот равна работе для изотермического процесса и выражается площадью $ABGF$.

Δ 12-20. Компрессор должен давать в час 50 м^3 сжатого воздуха при давлении $8 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Компрессор охлаждается проточной водой, так что процесс сжатия можно считать изотермическим.

а) Какой мощности мотор требуется к компрессору, если к. п. д. последнего 60%?

б) Какое количество проточной воды требуется, если температура ее в змеевике компрессора повышается от 11 до 17°C ? Наружное давление считать равным $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

□ 12-21. Двигатель внутреннего сгорания работает по циклу, теоретическая диаграмма которого представлена на рисунке 12-5. Процесс 1—2 — сжатие горючей смеси; 2—3 — вспышка; 3—4 — рабочий ход; 4—5 — падение давления при открывании выпускного клапана; 5—6 — выпуск отработавших газов; 6—1 — засасывание горючей смеси. Принимая во внимание, что процессы 1—2 и 3—4 могут считаться адиабатными и что процессы 2—3 и 4—5 могут быть заменены изохорическими процессами, вычислить максимальный к. п. д. двигателя, если известно, что $\frac{V_1}{V_2} = 4$; $\frac{c_p}{c_v}$ для горючей смеси и продуктов сгорания равно 1,3.

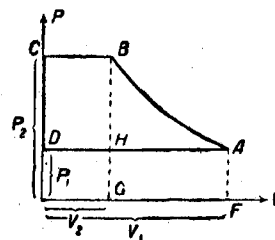


Рис. 12-4.

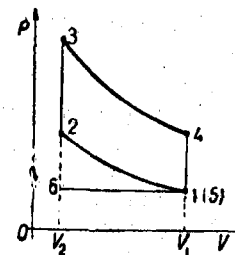


Рис. 12-5.

□ 12-22. а) Показать, что процесс, при котором во время изменения температуры газа производится работа, пропорциональная разности конечной и начальной температур, может быть описан уравнением вида

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

где n постоянно (политропический процесс).

б) Показать, что при политропическом процессе удельная теплоемкость газа не зависит от температуры.

в) Выяснить, являются ли политропическими следующие процессы:

1) Процесс, происходящий при нагревании прибора, описанного в задаче 11-18.

2) Процесс, который происходит при повышении температуры газа в сосуде A (рис. 12-6). Давление вне сосуда A постоянно. Пружина P начинает растягиваться только после того, как поршень B , двигаясь вправо, перейдет положение, показанное на рисунке пунктиром.

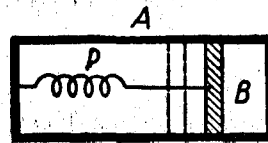


Рис. 12-6.



Рис. 12-7.

3) Процесс, который происходит при повышении температуры газа в левой части трубки, показанной на рисунке 12-7.

4) В приборе, показанном на рисунке 12-2, вдвигание поршня производится настолько медленно, что вследствие потери теплоты сквозь стенки изменение температуры газа при малом продвижении поршня вдвое меньше, чем при быстром вдвигании на то же расстояние.

г) Как изменяются при повышении температуры удельные теплоемкости газа в случаях 1), 2), 3) и 4)?

§ 13. Кинетическая теория газов

1) Средняя квадратичная скорость и средняя скорость частиц

$$c = \sqrt{\frac{\sum v^2}{w}}; \quad u = \frac{\sum v}{w},$$

где v — скорость частицы; w — число частиц.

2) Постоянная Больцмана

$$k = \frac{R}{N},$$

где R — газовая постоянная; N — число Авогадро.

3) Давление газа

$$p = \frac{1}{3} n m c^2 = n k T,$$

где m — масса молекулы; n — число молекул в 1 см^3 (концентрация молекул).

4) Средняя квадратичная скорость молекул газа и частиц

$$c = \sqrt{\frac{3 R T}{\mu}} = \sqrt{\frac{3 k T}{m}}.$$

5) Закон Максвелла о распределении газовых молекул по интервалам скоростей

$$\Delta n = n \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{v^2}{\rho^3} \cdot e^{-\frac{v^2}{\rho^2}} \cdot \Delta v = n f(v) \Delta v;$$

где $\rho = \sqrt{\frac{2 R T}{\mu}}$ есть скорость, соответствующая максимуму функции и распределения по интервалам скоростей $f(v)$, называемая наиболее вероятной скоростью.

6) Средняя скорость при максвелловском распределении

$$u = \sqrt{\frac{8 R T}{\pi \mu}}.$$

7) Число столкновений одной молекулы за 1 сек

$$z = \sqrt{2} \pi \sigma^2 n u,$$

где σ — диаметр молекулы.

8) Средний свободный пробег

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n}.$$

9) Вязкость газа

$$\eta = 0,49 D \lambda u,$$

где D — плотность газа.

10) Число молекул v , ударяющих за 1 сек в площадку 1 см^2 , помещенную в газе,

$$v = \frac{n u}{4}.$$

○ 13-1. В сосуде емкостью 230 см^3 находится газ при давлении $0,01 \text{ мм}$ и температуре 7°С . Сколько молекул находится в сосуде?

△ 13-2. Плотность смеси азота и водорода при температуре 47°С и давлении 2 ат равна $0,3 \text{ г/л}$. Какова концентрация молекул водорода в смеси?

△ 13-3. В стеклянном сосуде сферической формы с внутренним диаметром 3 см находится азот, давление которого

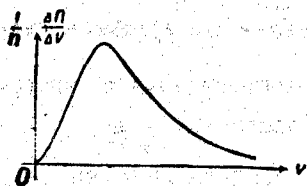


Рис. 13-1.

при температуре 190°C равно $0,01\text{ мм рт. ст.}$ На стенках сосуда имеется мономолекулярный слой адсорбированного азота. Площадь, занимаемая одной молекулой азота на стенке, равна $1 \cdot 10^{-15}\text{ см}^2$. Каково давление азота в сосуде при температуре 427°C , при которой азот полностью десорбируется со стенок?

△ 13-4. Сосуд, содержащий некоторое количество газа, движется со скоростью v , затем внезапно останавливается.

На сколько увеличится при этом квадрат средней квадратичной скорости молекул газа:

а) в случае одноатомного газа?

б) в случае двухатомного газа? Каков физический смысл полученного результата?

○ 13-5. Определить среднюю квадратичную скорость газовых молекул: а) кислорода при 132°C ; б) гелия при $0,1^{\circ}\text{K}$.

○ 13-6. Какая температура соответствует средней квадратичной скорости молекул углекислого газа, равной $720 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$?

○ 13-7. Определить среднюю квадратичную скорость капельки воды с радиусом 10^{-6} см , взвешенной в воздухе при 17°C .

○ 13-8. На рисунке 13-1 дан график, показывающий распределение скоростей молекул газа по закону Максвелла. По оси абсцисс отложена скорость молекул v ; по оси ординат отложена величина $\frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta v}$, где Δn — число молекул, обладающих скоростями, заключенными в пределах между v и $v + \Delta v$; n — общее число молекул в данном объеме.

а) Откуда видно, что средняя скорость больше наиболее вероятной скорости?

б) Чему равна общая площадь, ограниченная осью абсцисс и графиком?

в) Как надо изменить абсциссы и ординаты графика, соответствующие температуре T_1 , чтобы получить график распределения скоростей при температуре T_2 ? Начертить приблизительно график, соответствующий в 4 раза более высокой температуре.

○ 13-9. Определить среднюю и наиболее вероятную скорости молекул кислорода при 132°C .

○ 13-10. Чему равна вероятность того, что какая-нибудь молекула имеет скорость, точно равную наиболее вероятной скорости?

△ 13-11. Кроме распределения газовых молекул по интервалам скоростей, указанного в пункте 5) введения к настоящему параграфу, можно рассматривать распределение молекул по

интервалам энергий, а также по интервалам логарифмов скоростей или энергий.

а) Показать, что максимум функций распределения по интервалам энергий молекул соответствует скорости $v_0 = \frac{p}{\sqrt{2}}$.

б) Показать, что максимум функции распределения молекул по интервалам логарифмов скоростей молекул или их энергий соответствует средней квадратичной скорости.

△ 13-12. а) Какой процент молекул обладает скоростями, разняющимися от наиболее вероятной не более чем на 1%?

б) Тот же вопрос относительно средней квадратичной скорости.

в) Почему в случае б) получается более высокий процент, чем в случае а)?

△ 13-13. Показать, что число молекул некоторой массы газа, скорости которых меньше средней квадратичной скорости и больше средней, одно и то же при любой температуре.

△ 13-14. Как изменится концентрация молекул двухатомного газа, скорости которых отличаются от наиболее вероятной скорости не более чем на $1 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, если произойдет адиабатное расширение в два раза?

○ 13-15. Найти число молекул азота, заключающихся при нормальных условиях в 1 см^3 и обладающих скоростью: а) между 99 и 101 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$, б) между 499 и 501 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

△ 13-16. При какой температуре число молекул азота, обладающих скоростями в интервале $299—301 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, равно числу молекул, обладающих скоростями в интервале $599—601 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

△ 13-17. Показать, что средняя квадратичная относительная скорость движения двух молекул равна $r = c\sqrt{2}$, где c — средняя квадратичная скорость относительно стенок сосуда.

○ 13-18. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул азота равна 1 мм , если при нормальном давлении она равна $6 \cdot 10^{-6}\text{ см}$?

○ 13-19. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул водорода равна $2,5\text{ см}$? Температура 68°C .

△ 13-20. Найти среднюю продолжительность свободного пробега молекул кислорода при давлении 2 мм рт. ст. и при 27°C .

△ 13-21. Определить число всех столкновений между молекулами, которые произойдут в течение 1 сек в 1 см^3 азота при нормальных условиях.

△ 13-22. Средняя длина свободного пробега в азоте равна при нормальных условиях $6 \cdot 10^{-6}\text{ см}$. Некоторая масса азота пе-

решла от нормальных условий к состоянию, при котором ее температура равна 300°C . Какова длина свободного пробега в новом состоянии азота, если процесс перехода был: а) изохорическим; б) изобарическим; в) адиабатическим?

Δ 13-23. Как изменится вязкость двухатомного газа, состояние которого далеко от вакуума, при уменьшении объема в два раза, если процесс перехода был: а) изотермическим; б) изобарическим; в) адиабатическим?

Δ 13-24. Зная вязкость кислорода (см. таблицу IX), определить длину свободного пробега в нем при нормальных условиях.

Δ 13-25. Вязкость некоторого газа определяется методом измерения силы трения между пластинами, отделенными друг от друга слоем этого газа толщиной $0,9\text{ мм}$. При давлении $2,8 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$

вязкость газа оказалась равной $0,80 \cdot 10^{-5} \frac{\text{н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$, при давлении

$10,9 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ и давлении $16,0 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ вязкость равна $1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$.

Какова приблизительно длина свободного пробега молекул этого газа при нормальном давлении?

○ 13-26. Сколько молекул ударяется за 1 сек в 1 см^2 стенки сосуда, в котором находится кислород при давлении 750 мм рт. ст. и температуре 20°C ?

Δ 13-27. Как изменится число ударов двухатомного газа в 1 см^2 стенки в сосуде за 1 сек , если объем газа адиабатно увеличится в $\gamma=2$ раза?

Δ 13-28. Предполагая, что каждая молекула кислорода, попавшая на поверхность металлического волоска в калильной лампе, адсорбируется, рассчитать, сколько времени требуется для покрытия волоска мономолекулярным слоем кислорода, если давление его равно $p=1 \cdot 10^{-5}\text{ мм рт. ст.}$, а температура $t=27^\circ\text{C}$. Принять, что каждая молекула кислорода занимает на поверхности волоска площадь $S=9 \cdot 10^{-16}\text{ см}^2$.

§ 14. Реальные газы. Критическое состояние

1) Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{V_\mu^2}\right)(V_\mu - b) = RT,$$

где p — давление, V_μ — объем 1 моля веществ, R — универсальная газовая постоянная, a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса (см. таблицу XV). В случае если газ не уплотнен и имеет место соотношение $V_\mu \gg b$, уравнению Ван-дер-Ваальса можно придать вид:

$$pV_\mu = RT + \frac{RTb - a}{V_\mu}.$$

2) Соотношение между постоянными Ван-дер-Ваальса и параметрами критического состояния (V_k — критический объем 1 моля газа)

$$R = \frac{8p_k V_k}{3T_k}; \quad a = 3p_k V_k^2; \quad b = \frac{V_k}{3}.$$

○ 14-1. Каков физический смысл выражения $\left(p + \frac{a}{V_\mu^2}\right)$?

○ 14-2. 1 моль аргона имеет при температуре 300°K объем 1 л. Вычислить давление аргона: а) считая, что он обладает свойствами идеального газа; б) принимая во внимание поправку Ван-дер-Ваальса на давление, но пренебрегая поправкой на объем; в) принимая во внимание поправку на объем, но пренебрегая поправкой на давление; г) принимая во внимание обе поправки Ван-дер-Ваальса.

○ 14-3. Вычислить, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, давление массы $m=1,1\text{ кг}$ углекислого газа, заключенного в баллоне емкостью $V=20\text{ л}$, при температуре $t=13^\circ\text{C}$. Сравнить результат с давлением идеального газа при тех же условиях.

○ 14-4. Вычислить температуру, при которой давление кислорода, имеющего плотность $100 \frac{\text{г}}{\text{л}}$, равно 70 ат . Сравнить с идеальным газом.

Δ 14-5. В баллоне емкостью 20 л находится 80 моль некоторого газа. При 14°C давление газа равно 90 ат ; при 63°C давление газа равно 109 ат . Вычислить постоянные Ван-дер-Ваальса для этого газа.

Δ 14-6. Рассмотреть, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, изотермические процессы в газах такой плотности, что условие $V_\mu \gg b$ является выполненным.

а) При какой температуре газ более сжимаем, чем идеальный, при какой менее сжимаем?

б) При какой температуре изотермические процессы в газе протекают так же, как в идеальном газе? Найти эти температуры для углекислого газа и для водорода.

Δ 14-7. Газ расширяется при постоянной температуре (27°C), причем объем 1 моля газа увеличивается от $1,5$ до 15 л . Принимая, что условие $V_\mu \gg b$ выполняется, определить, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, работу при расширении 1 моля газа. Сделать расчеты: а) для азота; б) для водорода.

□ 14-8. В опыте Джоуля—Томсона измеряется изменение температуры газа при его дросселировании (течении газа в условиях тепловой изоляции и значительном перепаде давления, например сквозь ватный тампон, рис. 14-1). В курсах физики доказывается, что при дросселировании газа имеет место соотношение

$$p_1 V_1 + U_1 = p_2 V_2 + U_2,$$

где U — внутренняя энергия газа.

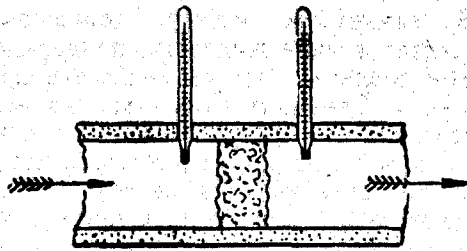


Рис. 14-1.

а) Пользуясь указанным соотношением, показать, что в случае идеального газа температура газа при дросселировании остается постоянной.

б) Сделать, пользуясь формулой Ван-дер-Ваальса, приближенный подсчет изменения температуры: 1) углекислого газа; 2) водорода (при дросселировании от давления $p_1 = 2 \text{ ат}$ до давления $p_2 = 1 \text{ ат}$ при начальной температуре 17°С). Принять, что при этих условиях $V_p \gg b$ и изменение внутренней энергии при дросселировании мало (меняется только соотношение между кинетической энергией теплового движения молекул и потенциальной энергией их взаимодействия).

□ 14-9. Найти критическую плотность воды.

△ 14-10. Найти критическое давление и температуру аргона.

△ 14-11. Найти постоянные a и b уравнения Ван-дер-Ваальса для углекислого газа по его критическим давлению $p_k = 73 \text{ ат}$ и температуре $t_k = 31,1^\circ \text{С}$.

□ 14-12. Для демонстрации критического состояния употребляют прибор русского физика Авенариуса (рис. 14-2), в котором производится нагревание запаянной трубки с этиловым эфиром.



Рис. 14-2.

а) Какую часть объема трубки должен занимать эфир при температуре 20°С , если мы хотим, чтобы при достижении критической температуры весь объем трубки был заполнен эфиром в критическом состоянии? Молекулярный вес эфира равен $74 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$. Критические температура и давление эфира равны $193,8^\circ \text{С}$ и $35,6 \text{ ат}$.

б) Что будет происходить при повышении температуры, если объем трубки больше или меньше критического объема эфира, заключенного в трубке?

в) Начертить примерные графики p, t для случаев, когда объем трубки равен, больше и меньше критического объема эфира в трубке. Для упрощения чертежа принять, что при температурах выше критической эфир имеет свойства идеального газа.

□ 14-13. В замкнутом сосуде, содержащем некоторое вещество в виде жидкости, поддерживается постоянное давление (это схематически показано на рис. 14-3). Температура постепенно повышается от значения меньше критической до значения больше критической. Начертить примерные графики зависимости объема вещества от температуры для случаев: а) давление равно критическому; б) давление больше критического; в) давление меньше критического. Для упрощения чертежа принять, что при температурах выше критической вещество имеет свойства идеального газа.



Рис. 14-3.

△ 14-14. При приближении вещества к критическому состоянию теплоемкость при постоянном давлении беспредельно растет. Объяснить это.

§ 15. Молекулярные силы в жидкостях

1) Если две жидкие (или жидкая и газообразная) среды граничат по кривой поверхности с главными радиусами кривизны R_1 и R_2 , то при равновесии имеет место разность давлений в этих средах

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

где σ — поверхностное натяжение.

2) Работа при изотермическом увеличении поверхности жидкости на величину ΔS

$$A = \sigma \Delta S.$$

3) Высота поднятия жидкости в капиллярных трубках

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r g D} \quad (\text{при } h \gg r).$$

4) Краевой угол θ для случая смачивания во всех задачах предполагается равным нулю; краевой угол для ртути 138° .

5) Температура во всех задачах предполагается равной 20°С (кроме задачи 15-1).

□ 15-1. Какова плотность воды в капелке, радиус которой равен 10^{-6} см при $t = 4^\circ \text{С}$?

△ 15-2. Из крана вытекает вертикальная струя воды. Диаметр струи на протяжении 3 см уменьшается с 3 до 2 мм (рис. 15-1). Какой объем воды протекает за 1 сек ?

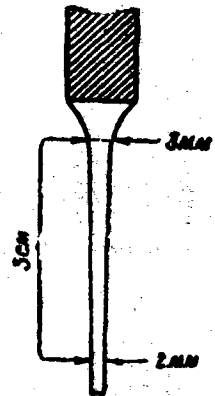


Рис. 15-1.

Указание. При расчете разности давлений воды и воздуха для некоторого уровня принимать поверхность струи за цилиндрическую.

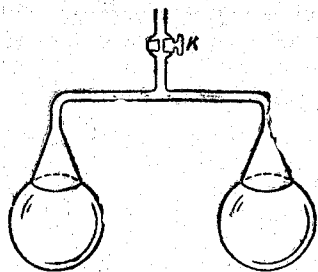


Рис. 15-2.

△ 15-3. а) Какую работу надо произвести, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром $d=14$ см, если процесс раздувания пузыря изотермический? б) Чему равно избыточное давление внутри этого пузыря?

△ 15-4. Поверхностное натяжение на границе вода — масло можно принять равным $\sigma=18 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$. Какую ра-

боту надо произвести, чтобы каплю масла с массой $m=1$ г раздробить внутри воды на капельки диаметром $d=2 \cdot 10^{-4}$ см, если процесс дробления происходит изотермически? Плотность масла $D=0,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

□ 15-5. На двух одинаковых воронках выдuty два мыльных пузыря. Кран K закрыт (рис. 15-2).

а) Показать, что при одинаковых диаметрах пузырей имеет место равновесие, причем это равновесие является устойчивым в случае, если каждый из пузырей имеет форму полусферы или меньше ее, и неустойчивым, если пузыри имеют форму большей части сферы.

б) Пусть диаметры отверстий воронок равны 4 см, и на них выдuty пузыри с диаметрами по 5 см. Воздух из одного пузыря будет перетекать в другой пузырь, пока радиусы кривизны пузырей не сделаются снова равными. Принимая, что плотность воздуха при перетекании из одного пузыря в другой не меняется, определить диаметр большего пузыря.

Примечание. При решении принять во внимание, что объем сегмента шара вычисляется по формуле

$$V = \frac{\pi}{24} [2a^3 \pm \sqrt{d^2 - a^2} (2d^2 + a^2)],$$

где d — диаметр шара; a — диаметр основания сегмента. Знак «+» ставится в том случае, если центр шара находится внутри сегмента, знак «-» в противоположном случае.

△ 15-6. Капля воды равномерно падает в воздухе. На сколько радиус кривизны в нижней точке ее поверхности отличается от радиуса кривизны в верхней точке ее поверхности, если расстояние между этими точками равно $d=2$ мм?

□ 15-7. В проволочное сито, все проволочки которого покрыты тонким слоем парафина, можно налить воду. Каким образом удерживается вода в сите? Почему сито протекает, если коснуться его снизу пальцем?

△ 15-8. Круглая стеклянная пластинка прикасается к воде (рис. 15-3). Ее тянут вверх посредством пружины L .

а) Нарисовать несколько последовательных форм поверхности воды, получающихся при движении пластинки вверх. В ка-

кой момент пружинка натянута в наибольшей мере? Что происходит, если движение пластинки вверх продолжается после этого момента?

б) Принимая для простоты расчета, что радиус кривизны R (рис. 15-3) на высоте $\frac{h}{2}$ равен $\frac{h}{2}$, и пренебрегая второй кривизной боковой поверхности воды под пластинкой, рассчитать силу, с которой натянута пружинка L при отрыве от воды пластинки с площадью сечения $S=20$ см².

△ 15-9. Капиллярная трубка A (рис. 15-4) соединена резиновой трубкой B с широкой трубкой C . Трубку C медленно поднимают вверх, причем жидкость в трубке A доходит до верхнего края, а затем выливается.

а) Нарисовать несколько последовательных положений уровня жидкости в трубке A при подъеме трубки C (в случаях смачивания и несмачивания). В какой момент разность уровней в трубках C и A будет наиболее велика?

б) Какова наибольшая разность уровней воды в трубках A и C , если трубки стеклянные и если наружный диаметр трубки A равен 0,7 мм.

в) Произвести тот же расчет для ртути, если диаметр внутреннего канала трубки A равен 0,55 мм.

△ 15-10. Сквозь стеклянный капилляр, погруженный в жидкость, продувается воздух.

а) Нарисовать несколько последовательных положений уровня в капилляре и образования пузырька (в случаях смачивания и несмачивания). В какой момент давление в капилляре наибольшее?

б) Вычислить разницу между наибольшим давлением в капилляре и давлением атмосферы в случае, если внутренний канал капилляра имеет диаметр $d_1=0,8$ мм; жидкость — скипидар, смачивающий стекло; глубина погружения капилляра $h_1=5$ см.

в) Провести тот же расчет для ртути (не смачивает стекло).

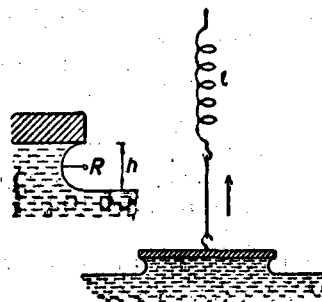


Рис. 15-3.

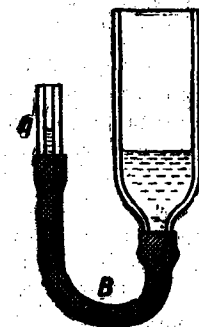


Рис. 15-4.

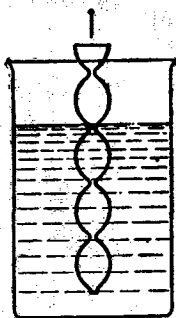


Рис. 15-5.

Внешний диаметр капилляра $d_2=1,2$ мм. Глубина погружения капилляра в ртуть $h_2=2$ см.

○ 15-11. В спирт опущена на ничтожную глубину трубка с диаметром внутреннего канала $d=0,5$ мм. Каков вес P вошедшего в нее спирта?

○ 15-12. Стекло́нная трубка имеет форму, показанную на рисунке 15-5. Длина каждого звена 10 см, а внутренний радиус в самой узкой части равен 0,1 мм. Трубку опускают в вертикальном положении в сосуд с водой, а затем медленно, без толчков, поднимают. Как будет перемещаться уровень воды в трубке?

○ 15-13. Две стеклянные трубки, внутренние диаметры которых равны 0,2 и 0,3 мм, соединены внизу резиновой трубкой и заполнены водой. При каком условии уровень воды в трубках одинаков?

□ 15-14. В стеклянный капилляр с внутренним каналом диаметром $d_1=2$ мм вставлена стеклянная палочка диаметром $d_2=1,5$ мм так, что просвет в канале всюду одинаков. Определить высоту капиллярного поднятия воды в канале.

○ 15-15. Когда жидкость поднимается по капиллярной трубке на высоту h , то сила поверхностного натяжения $F=2\pi r\sigma$ производит работу $Fh = \frac{4\pi\sigma^2}{Dg}$. Между тем потенциальная энергия столбика жидкости равна $\pi r^2 h Dg \frac{h}{2} = \frac{2\pi\sigma^2}{Dg} (\pi r^2 h Dg$ — вес

поднятой жидкости; $\frac{h}{2}$ — высота ее центра тяжести). Следова-

тельно, приращение потенциальной энергии равно половине работы капиллярной силы. На что истрачена другая половина?

□ 15-16. Внутри горизонтальной трубки, наружный и внутренний диаметры которой равны 2,5 и 0,3 мм, находится столбик воды. Трубку приводят в вертикальное положение, причем часть воды нависает снизу в виде капельки, которую можно принять за сегмент сферы с диаметром 3 мм (рис. 15-6). Какова длина столбика воды при горизонтальном положении трубки? (При решении принять во внимание примечание к задаче 15-5.)



Рис. 15-6.

○ 15-17. Стекло́нная капиллярная трубка, диаметр внутреннего канала которой $d=0,2$ мм, а длина $h_0=20$ см, опускается в вертикальном положении в воду. Верхний конец трубки запаян. Какой отрезок x трубки должен находиться под водой, чтобы уровень воды в капилляре и вне его был одинаков? Давление воздуха $p=750$ мм рт. ст.

△ 15-18. а) Стекло́нная капиллярная трубка, диаметр внутреннего канала которой 1,5 мм, а длина 20 см, опускается в горизонтальном положении в ртуть так, что имевшийся в ней воздух полностью остается в ней. Какая будет длина l_1 столбика воздуха в трубке, когда она будет опущена на глубину 10 см? Давление воздуха нормальное.

б) Решить тот же вопрос для глубины погружения 0,5 см.

△ 15-19. В изогнутой U-образной капиллярной трубке налиты две несмешивающиеся жидкости (например, ртуть и вода, рис. 15-7). Справедливо ли в этом случае соотношение

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{D_2}{D_1}?$$

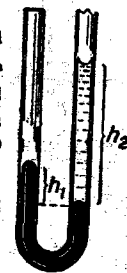


Рис. 15-7.

§ 16. Свойства паров. Влажность воздуха

1) Таблицы XVII и XVIII.

2) При вычислениях, касающихся давления и плотности насыщенных паров, следует при малых плотностях паров пользоваться характеристическим уравнением для идеальных газов, а при больших плотностях паров — уравнением Ван-дер-Ваальса (см. введения к § 11 и 14).

3) Полной теплотой парообразования называется количество теплоты, требующееся для превращения 1 кг воды при 0°С в пар данной температуры.

4) Внешняя теплота парообразования

$$r = p(v_1 - v_2),$$

где v_1 и v_2 — удельные объемы пара и жидкости.

5) Давление паров вблизи сферической поверхности жидкости

$$p = p_0 + \frac{2D_1\sigma}{D_2r},$$

где p_0 — давление паров вблизи плоской поверхности; σ — поверхностное натяжение; D_1 и D_2 — плотности пара и жидкости; r — радиус сферы.

6) При решении задач этого параграфа можно полагать при всех температурах удельную теплоемкость воды равной $1 \frac{\text{кал}}{2 \cdot \text{град}} = 4185 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ и удельный объем воды $1 \frac{\text{см}^3}{2}$, пренебрегая небольшими изменениями их при повышении температуры.

○ 16-1. Громадная часть поверхности Земли покрыта водной оболочкой. Почему, несмотря на это, атмосфера не насыщена водяными парами?

○ 16-2. Какого внутреннего диаметра следует сделать паропровод от парового котла к двигателю, если по паропроводу

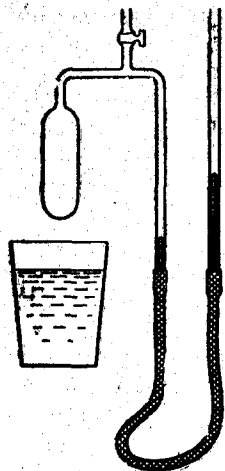


Рис. 16-1.

должно в течение часа проходить 400 кг пара при давлении $10 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и при температуре 200°C и если скорость движения пара не должна превышать $40 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

Δ 16-3. Предположим, что манометр, описанный в задаче 11-4, присоединен к резервуару, в котором находятся остатки воздуха и насыщенные пары ртути. Каково давление в резервуаре при условиях задачи 11-4, если отсчет по манометру производился при температуре 20°C , которой соответствует давление насыщающих паров ртути, равное $0,0013 \text{ мм рт. ст.}$?

○ 16-4. В комнате объемом 120 м^3 при температуре 15°C относительная влажность равна 60% . Определить массу водяных паров в воздухе комнаты.

○ 16-5. Какова плотность воздуха при 29°C при относительной влажности 70% и нормальном давлении?

Δ 16-6. В замкнутом сосуде емкостью 2 л находятся 1 г воды и воздух. При температуре 14°C давление в сосуде равно 760 мм рт. ст. Каково будет давление при температурах: а) 93°C ? б) 100°C ?

При расчете пренебречь изменением объема воздуха вследствие испарения воды.

Δ 16-7. Резервуар газового термометра (рис. 16-1) наполнен воздухом. Давление в резервуаре газа при 0°C равно 757 мм рт. ст. , а при помещении в сосуд с водой равно 840 мм рт. ст. Рассчитать температуру воды: а) предполагая, что воздух сухой; б) предполагая, что воздух при 15°C имеет 60% влажности.

Δ 16-8. В замкнутом прочном металлическом сосуде емкостью 1000 см^3 находится 1 г воды и пара.

а) Сколько в сосуде пара и сколько воды, если температура $17,2^\circ \text{C}$?

б) При какой температуре сосуд будет наполнен одним насыщающим паром?

в) Сколько теплоты затрачивается при нагревании воды и пара от $17,2^\circ \text{C}$ до найденной температуры?

Δ 16-9. В замкнутый сосуд емкостью 6 л , содержащий насыщенный пар при давлении $2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, вбрызгивается некоторое количество воды при 10°C . Давление пара в сосуде понижается до $1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$. Какое количество воды введено в сосуд?

○ 16-10. Определить внешнюю теплоту парообразования воды при давлении: а) $0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и б) $10 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$.

○ 16-11. Определить изменение внутренней энергии при превращении в пар 4 г спирта во время кипения при нормальном давлении (78°C). Удельный объем паров спирта $607 \frac{\text{см}^3}{\text{г}}$. Теплота кипения спирта $206 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$.

Δ 16-12. В воде на глубине 35 см находится пузырек воздуха диаметром $0,1 \text{ мм}$. Давление атмосферы равно 750 мм рт. ст. Температура воды 21°C . Каково давление воздуха внутри пузырька?

Δ 16-13. При отсутствии пузырьков воздуха в жидкости ее можно перегреть несколько выше точки кипения. Предположим, что при нормальном атмосферном давлении вода перегрета до 105°C . Высота уровня воды относительно дна равна 20 см . Определить диаметр пузырька пара вблизи дна, при котором давление пара в пузырьке и давление жидкости уравниваются. Является ли это равновесие устойчивым?

○ 16-14. Каково давление водяных паров вблизи капельки воды, радиус которой $5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, при температуре 10°C ?

Δ 16-15. В 1 м^3 охлаждающегося воздуха находится $8,3 \text{ г}$ водяных паров.

а) При какой температуре начнется конденсация, если центрами конденсации являются пылинки, которые можно принять за шарики с диаметром 10^{-5} см ?

б) При какой температуре начнется конденсация в пористом материале, смачиваемом водой, если диаметр каналов в нем равен 10^{-5} см ?

Δ 16-16. Принимают, что $\gamma=0,036$ всех молекул водяного пара, попавших на поверхность воды, задерживаются ею. Подсчитать массу всех молекул, вылетающих в течение 1 сек с 1 см^2 воды при 100°C в находящийся над ней насыщенный водяной пар.

§ 17. Свойства растворов

1) Осмотическое давление π граммов вещества с молекулярным весом μ , растворенных в объеме V раствора:

а) $\pi = \frac{mRT}{\mu V}$ для недиссоциирующих веществ;

б) $\pi = [1 + \alpha(k-1)] \frac{mRT}{\mu V}$ для диссоциирующих веществ,

где α — доля диссоциированного вещества; k — число ионов, получающихся при диссоциации одной молекулы.

2) Точка кипения раствора, содержащего 1 г вещества с молекулярным весом μ на 100 см^3 растворителя, выше точки кипения чистого растворителя на

$$\theta = \frac{C}{\mu},$$

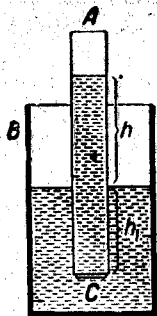


Рис. 17-1.

где C — постоянная для данного растворителя величина (для не диссоциирующих в растворе веществ).

3) Количество газа, растворенного в жидкости, пропорционально парциальному давлению этого газа над жидкостью.

○ 17-1. Каково осмотическое давление 8 г нафталина ($C_{10}H_8$), растворенных в 110 г бензола, при температуре 27°C ? (Нафталин, растворяясь в бензоле, не диссоциирует.)

○ 17-2. В 500 см^3 воды растворено 1,5 г хлористого натрия. Каково осмотическое давление в растворе при 0°C , если считать, что хлористый натрий полностью диссоциирован?

○ 17-3. Какое количество m_1 хлористого натрия (NaCl) надо растворить в 100 см^3 воды, чтобы получить раствор с таким же осмотическим давлением, какое имеет раствор $m_2=0,4\text{ г}$ хлорной меди (CuCl_2), растворенной в таком же объеме воды и при той же температуре? Считать, что в обоих случаях имеется полная диссоциация растворенного вещества.

△ 17-4. Цилиндрическая трубка A (рис. 17-1) с площадью сечения 2 см^2 содержит раствор сахара ($C_{12}H_{22}O_{11}$). Снизу она закрыта перепонкой C , пропускающей чистую воду, но не пропускающей сахара (перепонка из железистосинеродистой меди). Трубка A опущена в сосуд B с чистой водой, причем перепонка C находится на высоте $h_1=3\text{ см}$ ниже уровня воды в сосуде B . При равновесии уровень раствора в трубке A на высоте $h=10\text{ см}$ выше уровня воды в сосуде B . Температура 13°C . Плотность раствора мало отличается от плотности воды. Сколько сахара растворено в трубке A ?

△ 17-5. Предположим, что сосуд B с трубкой A (рис. 17-1) находится в пространстве, наполненном паром растворителя. Показать, что давление пара над слабым раствором меньше давления пара над чистым растворителем на величину

$$\Delta p = P \frac{D_1}{D_2} = p \frac{n_s}{n_p},$$

где D_1 — средняя плотность пара между уровнями в трубке и в сосуде; D_2 — плотность раствора; p — давление пара над чистым растворителем; n_s и n_p — концентрации (числа в 1 см^3) молекул растворенного вещества и растворителя.

△ 17-6. В 500 см^3 воды растворено 15 г сахара. Каково давление паров над раствором, если температура раствора 100°C ? Плотность раствора принять равной $1\frac{2}{\text{см}^3}$.

○ 17-7. При нормальном атмосферном давлении раствор хлористого натрия в воде кипит при температуре выше 100°C . Какова температура паров над раствором?

△ 17-8. а) Точка кипения воды вблизи 100°C при повышении давления на 3 мм рт. ст. повышается на $0,11^\circ\text{C}$. Определить для воды постоянную C .

б) Каков молекулярный вес вещества, если раствор 10 г этого вещества в 100 см^3 воды кипит при температуре на $0,18^\circ\text{C}$ выше, чем чистая вода? Вещество при растворении не диссоциирует.

△ 17-9. На сколько точка кипения раствора $1,5\text{ г}$ хлористого натрия в 200 см^3 воды выше точки кипения чистой воды? Принять, что хлористый натрий полностью диссоциирован.

○ 17-10. При температуре 20°C один литр воды поглощает 28 см^3 кислорода. Какова плотность кислорода в воде, находящейся в соприкосновении с атмосферным воздухом при нормальном давлении? Принять, что вес кислорода составляет 23% веса воздуха.

△ 17-11. Колба наполовину заполнена водой, освобожденной от воздуха кипячением, наполовину азотом при давлении 760 мм рт. ст. Какое давление установится в колбе по достижении равновесия? Температура постоянна и равна 20°C . Известно, что при этой температуре 1 л воды поглощает 14 см^3 азота.

§ 18. Второй принцип термодинамики

1) Изменение энтропии массы m вещества, теплоемкость которого c является постоянной величиной, при нагревании от T_1 до T_2 .

$$\Delta S = mc \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

2) Изменение энтропии при изменении агрегатного состояния

$$\Delta S = \frac{\lambda}{T} m; \quad \Delta S = \frac{r}{T} m,$$

где λ и r — удельные теплоты плавления и испарения.

3) Изменение энтропии при процессах в идеальных газах

$$\Delta S = m \left(c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{V_2}{V_1} \right),$$

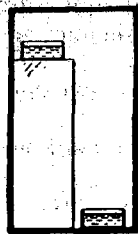
4) Уравнение Гиббса — Гельмгольца

$$F = U + T \frac{dF}{dT},$$

где F и U — свободная и внутренняя энергия.

5) Связь между изменением давления p , изменением температуры T перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое (v_1 и v_2 — удельные объемы вещества в двух состояниях, r — удельная теплота перехода его из первого состояния во второе)

$$\frac{\Delta T}{\Delta p} = \frac{(v_2 - v_1) T}{r}.$$



6) Изменение поверхностного натяжения с температурой

$$\frac{\Delta \sigma}{\Delta T} = - \frac{\gamma}{T},$$

где γ — количество теплоты, получаемой поверхностью жидкости извне при увеличении поверхности на 1 см^2 .

7) Соотношение приведенных теплот и работ для цикла Карно

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0,$$

$$A = Q_1 + Q_2.$$

где T_1 и T_2 — температуры горячего и холодного тел; количества теплоты Q_1 и Q_2 считаются положительными, если происходит передача количества теплоты от окружающих тел к рабочему телу; работа считается положительной в случае, если машина работает как двигатель.

8) Соотношение Больцмана:

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{A}{kT}},$$

где n_1 и n_2 — концентрации частиц, беспорядочно движущихся в объемах 1 и 2; A — работа перехода частицы из объема 1 в объем 2; k — постоянная Больцмана.

О 18-1. В замкнутом пространстве помещены один выше другого два открытых сосуда с одной и той же жидкостью (рис. 18-1). Если температуры жидкостей в начальный момент одинаковы, то вследствие испарения жидкости в верхнем сосуде и конденсации паров в нижнем жидкость в нижнем сосуде будет нагреваться, а в верхнем охлаждаться. Противоречит ли это второму принципу термодинамики?

О 18-2. Определить изменение энтропии при нагревании 30 см^3 железа от 20 до 100°C .

О 18-3. Найти изменение энтропии при охлаждении 2 г воздуха от 40 до 0°C ; а) при постоянном объеме; б) при постоянном давлении.

О 18-4. Определить изменение энтропии при процессах, описанных в задачах 12-10 и 12-15. Масса азота равна 6 г .

О 18-5. Определить изменение энтропии 1 г водорода в следующих случаях: а) газ сначала адиабатически сжимается до вдвое меньшего объема, затем изохорически охлаждается до начальной температуры; б) газ сначала адиабатически сжимается до вдвое меньшего объема, затем изотермически расширяется до начального объема.

О 18-6. 2 кг воды нагреваются от 10 до 100°C и при этой температуре обращаются в пар. Определить изменение энтропии.

Δ 18-7. Показать, что энтропия увеличивается при следующих процессах:

а) Горячая вода отдает теплоту такой же массе холодной воды и температуры их уравниваются.

б) Два одинаковых сосуда, изолированных от потери теплоты в окружающее пространство и содержащих одинаковые массы идеального газа при разных давлениях, соединены трубкой с краном. Кран открывается, и состояния газа в обоих сосудах становятся одинаковыми.

О 18-8. 200 г железа при 100°C опущены в калориметр, в котором находится 300 г воды при 12°C . Как меняется энтропия системы при уравнивании температур?

Δ 18-9. Смешиваются $V_1 = 5 \text{ л}$ и $V_2 = 3 \text{ л}$ двух разнородных, химически не реагирующих газов, имеющих одинаковую температуру $T = 300^\circ \text{K}$ и давление $p = 1 \text{ ат}$. Определить происходящее при этом изменение энтропии.

Δ 18-10. В калориметр, содержащий 250 г воды при 23°C , бросают 27 г льда при 0°C . Определить изменение энтропии, происшедшее к моменту окончания таяния льда. Теплоемкостью калориметра пренебречь.

□ 18-11. Пользуясь таблицей XIX, вычислить удельную теплоемкость водяного пара при постоянном объеме в интервале температур от $59,7$ до 93°C .

□ 18-12. Насыщающий водяной пар при давлении $14 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ адиабатно расширяется до давления $0,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$. Какой процент пара конденсируется при этом?

О 18-13. Как меняется точка плавления льда при увеличении давления на 1 ат ?

О 18-14. Вблизи 100°C точка кипения воды повышается на $0,11^\circ \text{C}$ при изменении давления на 3 мм рт. ст. . Определить теплоту парообразования воды.

Δ 18-15. В нижнем из сосудов, упомянутых в задаче 18-1, находится вода при температуре $17,2^\circ \text{C}$. Определить разность температур между верхним и нижним сосудами, если разность уровней в сосудах $h = 1 \text{ м}$. Теплообменом между сосудами пренебречь.

Δ 18-16. Определить изменение энергии, некоторого количества воды, имеющей температуру 20°C , при увеличении ее поверхности на 1 см^2 .

Δ 18-17. Предполагая, что изменение энергии воды при изменении ее поверхности на 1 см^2 остается одинаковым вплоть до такого распыления жидкости, при котором каждая капелька будет состоять только из одной молекулы, т. е. получатся пары,

рассчитать изменение энергии 1 г воды при ее превращении в пар при 20° С.

○ 18-18. Температура пара, поступающего из котла в паровую машину, равна $t_1 = 210^\circ \text{С}$. Температура в конденсаторе $t_2 = 40^\circ \text{С}$. Какова теоретически максимальная работа (в килоджоулях), которую можно получить при затрате 1 ккал на образование пара?

△ 18-19. Каково максимальное количество теплоты, которое может быть унесено из холодильной камеры при помощи холодильной машины при затрате $A = 1 \text{ кДж}$ работы, если температура в холодильной камере $t_2 = -10^\circ \text{С}$, а температура охлаждающей воды $t_1 = 11^\circ \text{С}$?

□ 18-20. Динамическим отоплением называется следующая система отопления. За счет энергии, выделяющейся при сжигании топлива, работает тепловой двигатель, ведущий холодильную машину. Холодильная машина отнимает теплоту от природного резервуара воды (например, от грунтовой воды) и отдает ее воде в отопительной системе. Одновременно вода в отопительной системе служит охладителем теплового двигателя. Определить теоретическое (без учета потерь) количество теплоты, которое отдает вода в калориферах отопления на 1 кг сожженного топлива при следующих условиях: теплотворность топлива $H = 5000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$; температура в котле паровой машины $t_1 = 210^\circ \text{С}$; температура грунтовой воды $t_2 = 15^\circ \text{С}$; температура воды в отопительной системе $t_3 = 60^\circ \text{С}$.

△ 18-21. Исходя из положения, что вероятность того, что n молекул газа, имеющих возможность попасть в любую точку объема V_1 , находятся в определенный момент в части этого объема V_2 , равна $w = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n$, показать, что изменение энтропии идеального газа при изотермическом расширении от V_2 до V_1 равно $\Delta S = k \ln w$, где k — постоянная Больцмана.

△ 18-22. В микроскоп сквозь диафрагму наблюдают броуновское движение частиц гуммигута, взвешенных в воде, при температуре 17° С. Оказалось, что средние числа частиц, видимые сквозь диафрагму на уровнях, отличающихся между собой на $h = 5 \mu$, равны $n_1 = 2,0$ и $n_2 = 3,2$. Считая объемы всех частиц одинаковыми, определить их.

§ 19. Передача теплоты

1) Количество теплоты, передаваемое слоем толщиной dx и поверхностью S за время τ

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} S \tau,$$

или при постоянстве градиента $\frac{dT}{dx}$

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{x} S \tau,$$

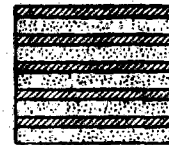


Рис. 19-1.

где λ — коэффициент теплопроводности вещества слоя.

2) Теплоотдача от одной среды в другую, например от железной стенки котла воде в нем,

$$Q = \alpha (T_1 - T_2) S \tau,$$

где α — коэффициент теплоотдачи.

○ 19-1. Наружная поверхность кирпичной стены толщиной 37 см (полтора кирпича) имеет температуру — 15° С, а внутренняя 20° С. Определить количество теплоты, проходящей за сутки сквозь 1 м² стены.

○ 19-2. В алюминиевой кастрюле кипит вода (при 100° С). Определить разность температур нижней и верхней поверхностей дна кастрюли при таких данных: толщина дна 2 мм; площадь дна 200 см²; в кастрюле выкипает за 5 мин 100 г воды. Обменом теплоты сквозь боковые стенки кастрюли и лучеиспусканием пренебречь.

△ 19-3. Между двумя металлическими стенками, имеющими температуру 20 и 30° С, зажаты сложенные вплотную деревянная пластинка, вырезанная параллельно волокнам, толщиной 3 см, и стеклянная пластинка толщиной 2 см. Пренебрегая небольшим скачком температуры в месте соприкосновения металла, дерева и стекла, определить температуру поверхности соприкосновения стекла и дерева.

△ 19-4. Сложены медная пластинка толщиной 6 мм и железная толщиной 4 мм. Определить коэффициент теплопроводности однородной пластинки (10 мм), проводящей теплоту в такой же степени, как и две данные пластинки.

△ 19-5. Кубик сложен из чередующихся пластинок разной толщины и различной теплопроводности (рис. 19-1). Показать, что теплопроводность кубика в направлении вдоль пластинок (λ_{\parallel}) больше, чем в направлении, перпендикулярном к ним (λ_{\perp}).

○ 19-6. Пространство между двумя горизонтальными плоскими стенками, имеющими различные температуры (нижняя холоднее), заполнено газом. Как отзывается на распределении температур то обстоятельство, что коэффициент теплопроводности газа возрастает с повышением температуры?

△ 19-7. Цилиндрический паропровод окружен асбестовой теплоизолирующей оболочкой. Наружная поверхность оболочки имеет температуру $t_1 = 50^\circ \text{С}$, а внутренняя, прилегающая к паропроводу, $t_2 = 120^\circ \text{С}$. Длина паропровода $l = 65 \text{ м}$; наружный

диаметр теплоизолирующей оболочки равен $d_1=13$ см, внутренний диаметр $d_2=7$ см. Определить количество теплоты, отдаваемое паропроводом во внешнее пространство в течение суток.

Δ 19-8. Две трубы одинаковых диаметров и длины окружены двухслойной изоляцией. Коэффициент теплопроводности материала одного слоя в 2 раза больше коэффициента теплопроводности материала другого слоя. Оба слоя имеют толщину, равную половине диаметра трубы. В первой трубе внутренним слоем теплоизоляции является слой с большей теплопроводностью, во второй — наоборот. Как разнятся количества теплоты, проходящие сквозь теплоизоляцию труб за одно и то же время, если перепад температуры между поверхностью трубы и внешней средой в обоих случаях один и тот же?

О 19-9. Определить количество теплоты, передаваемое поверхностью $0,5$ м² железной печи воздуху в течение часа, если температура воздуха 10°C , а температура печи 200°C .

Δ 19-10. Температура газов в топке парового котла 1000°C , температура воды в котле 180°C . Железные стенки котла имеют толщину 2 см; они покрыты с внутренней стороны слоем накипи толщиной 2 мм и с наружной стороны слоем сажи 1 мм. а) Какое количество теплоты передается за 1 ч через 1 м² поверхности? б) Определить температуры внутренних и наружных поверхностей слоя сажи, железной стенки и слоя накипи. Излучение топочных газов очень мало.

В этой главе наряду с системой единиц СИ используется также симметричная нерационализированная система единиц СГС (гауссова). В симметричной системе единиц электрическая и магнитная проницаемость для вакуума приняты $\epsilon=\mu=1$. В этой системе единиц во многих формулах в качестве коэффициента фигурирует скорость света в вакууме $c=3\cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

В системе СИ электрическая и магнитная проницаемости среды обозначены ϵ' и μ' и равны

$$\epsilon' = \epsilon \epsilon_0'; \quad \mu' = \mu \mu_0',$$

где $\epsilon_0'=8,84\cdot 10^{-12} \frac{\text{ф}}{\text{м}}$; $\mu_0'=4\pi\cdot 10^{-7} \frac{\text{з}}{\text{м}}$ суть проницаемости вакуума (электрическая и магнитная постоянные), а «относительные проницаемости» ϵ и μ совпадают со значением проницаемости в системе СГС.

Различие формул гауссовой системы единиц и системы СИ обусловлено также тем, что вторая является рационализированной. В рационализированной системе единиц единицы измерения электрической индукции D и магнитной напряженности H выбраны таким образом, что поток D вокруг единичного заряда и циркуляция H вокруг единичного тока имеют единичную величину (в гауссовой системе единиц в этих формулах есть дополнительный множитель 4π и $\frac{4\pi}{c}$ соответственно).

Формула в скобках относится к симметричной нерационализированной системе СГС (приводится в тех случаях, когда она отлична от формулы СИ).

§ 20. Взаимодействие зарядов

1) Закон Кулона: сила взаимодействия F между точечными зарядами q_1 и q_2 , находящимися на расстоянии r в среде с электрической проницаемостью ϵ ,

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon' r^2} \quad \left(F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \right).$$

2) Напряженность поля

$$E = \frac{F}{q}.$$

3) Связь между напряженностью и индукцией электрического поля

$$D = \epsilon E.$$

4) Напряженность поля точечного заряда и поля вне равномерно заряженного шара

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon' r^2} \quad \left(E = \frac{q}{\epsilon r^2}\right).$$

5) Напряженность поля заряженной прямой нити и поля вне равномерно заряженного цилиндра на расстоянии r от его оси

$$E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon' r} \quad \left(E = \frac{2\gamma}{\epsilon r}\right),$$

где γ — заряд единицы длины нити или цилиндра.

6) Напряженность поля плоскости, равномерно заряженной с плотностью σ ,

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon'} \quad \left(E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}\right).$$

7) Напряженность поля в плоском, цилиндрическом и сферическом конденсаторах:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon'} \quad \left(E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}\right);$$

$$E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon' r} \quad \left(E = \frac{2\gamma}{\epsilon r}\right);$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon' r^2} \quad \left(E = \frac{q}{\epsilon r^2}\right).$$

8) Напряженность поля, создаваемого диполем (рис. 20-1) в точке A на расстоянии $r \gg l$,

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon' r^3} \sqrt{1+3\cos^2\theta} \quad \left(E = \frac{p}{\epsilon r^3} \sqrt{1+3\cos^2\theta}\right),$$

где $p = q \cdot l$ — электрический момент диполя.

9) Если направление диполя p образует угол α с напряженностью поля E , то на диполь действует вращающий момент, равный

$$M = Ep \sin \alpha.$$

10) Во всех задачах, в которых природа диэлектрика, окружающего заряды, не указана, а также для воздуха следует принимать $\epsilon = 1$ СГС, а в системе СИ

$$\epsilon' = 8,84 \cdot 10^{-12} \frac{\phi}{\kappa}.$$

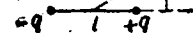


Рис. 20-1.

11) При решении задач полезно иметь в виду таблицу 11-4, в которой даны соотношения электрических и магнитных единиц разных систем единиц.

○ 20-1. Два одинаковых заряда, находящихся на маленьких шариках, отстоящих друг от друга на расстоянии 10 см, взаимодействуют в воздухе с силой $5 \cdot 10^{-4}$ н. Определить величину зарядов.

○ 20-2. На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону, причем сила электрического отталкивания капелек уравнивает силу их взаимного тяготения. Каковы радиусы капелек?

△ 20-3. Два маленьких проводящих шарика подвешены на длинных непроводящих нитях к одному крючку. Шарик заряжены одинаковыми зарядами и находятся на расстоянии 5 см друг от друга. Что произойдет после того, как один из шариков разрядить?

○ 20-4. Два заряда в вакууме взаимодействуют с такой же силой на расстоянии 11 см, как в скипидаре на расстоянии 7,4 см. Определить электрическую проницаемость скипидара.

△ 20-5. Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в керосин. Какова должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине был один и тот же?

△ 20-6. Электрон движется в вакууме в поле напряженностью $10 \frac{\phi}{\text{см}}$, направленном вертикально вниз. а) Где вблизи электрона напряженность поля равна нулю? б) Скорость электрона в верхней точке его траектории $2 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Каков радиус кривизны траектории в этой точке?

△ 20-7. Определить положение точки, в которой напряженность равна нулю вблизи двух неодинаковых зарядов q_1 и q_2 , находящихся на расстоянии l . Рассмотреть случаи: а) одноименных зарядов; б) разноименных зарядов.

○ 20-8. Определить напряженность поля в центре шестиугольника со стороной a , по вершинам которого расположены: а) шесть равных одноименных зарядов q ; б) три положительных и три отрицательных равных заряда.

△ 20-9. Принимая протон и электрон, из которых состоит атом водорода, за точечные заряды, находящиеся на расстоянии $5 \cdot 10^{-9}$ см, найти напряженность поля в точках B и C , отстоящих на таком же расстоянии от протона, как и электрон, и расположенных, как показано на рисунке 20-2.

△ 20-10. Молекулу воды можно

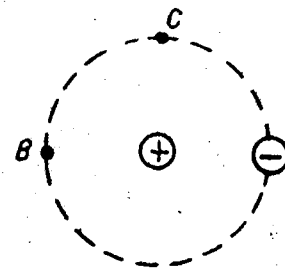


Рис. 20-2.

рассматривать как диполь, электрический момент которого равен $1,85 \cdot 10^{-18}$ СГС.

а) Принимая, что этот диполь составлен положительным и отрицательным зарядами, равными заряду электрона, найти длину диполя.

б) Определить напряженность поля, созданного диполем на расстоянии $3 \cdot 10^{-7}$ см от середины диполя в точке, лежащей на продолжении диполя, и в точке, лежащей на перпендикуляре к диполю.

в) Молекула воды и ион водорода находятся на расстоянии $3 \cdot 10^{-7}$ см. Определить наибольшее и наименьшее значения силы взаимодействия молекулы с ионом и вращающего момента, действующего на молекулу и на систему молекула — ион.

□ 20-11. а) Определить силу взаимодействия двух молекул паров воды, диполи которых составляют продолжение один другого. Электрический момент диполя воды равен $1,85 \cdot 10^{-18}$ СГС. Молекулы отдалены друг от друга на расстояние 10^{-7} см.

б) Сделать приблизительный подсчет работы, которую нужно произвести, чтобы отдалить друг от друга молекулы воды от расстояния $4 \cdot 10^{-8}$ см (примерно на таком расстоянии находятся молекулы в воде комнатной температуры) до расстояния, на котором силы взаимодействия диполей воды исчезающе малы (пар).

в) Какую работу нужно произвести, чтобы отдалить друг от друга все молекулы воды в 1 см^3 комнатной воды? Сравнить с внутренней теплотой парообразования воды комнатной температуры.

□ 20-12. На рисунке 20-3 показаны два одинаковых диполя (p), расположенных взаимно перпендикулярно на расстоянии $r \gg l$. Каковы вращающие моменты, действующие на диполь A, на диполь B и на всю систему в целом?

○ 20-13. Напряженность электрического поля Земли около поверхности в среднем равна $-130 \frac{\text{э}}{\text{м}}$. Какой заряд имела бы Земля, если бы напряженность около всей ее поверхности одновременно имела эту величину?

○ 20-14. На расстоянии 4 мм от прямой проволоки длиной 150 см, на которой равномерно распределен заряд $2 \cdot 10^{-7}$ к, находится пылинка с зарядом $-1,67 \cdot 10^{-16}$ к. Определить силу, действующую на пылинку.

Δ 20-15. Конденсатор, состоящий из пластин, разделенных воздушным промежутком, заряжен и помещен в сосуд. Затем в сосуд наливают керосин. Как меняется при этом напряженность и индукция электрического поля в следующих случаях:

а) Во время наливания керосина конденсатор отсоединен от источника напряжения?

б) Во время наливания керосина конденсатор присоединен к источнику постоянного напряжения?

Δ 20-16. Две плоские пластинки площадью 200 см^2 , заряженные равными зарядами, притягиваются, находясь в керосине, с силой $2,5 \cdot 10^{-2}$ н. Расстояние между пластинками столь мало, что напряженность поля можно рассчитывать по формуле для бесконечных плоскостей. Определить: а) находящиеся на них заряды; б) индукцию поля в керосине.

○ 20-17. Две одинаковые пластинки заряжены равными одноименными зарядами, причем расстояние между ними так мало, что напряженность поля между ними можно принять равной нулю. Как изменится сила взаимодействия между пластинками, если пространство между ними заполнить жидким диэлектриком с проницаемостью ϵ ?

Δ 20-18. Определить работу раздвигания на расстояние 3 см двух пластинок (200 см^2) плоского конденсатора, заряженных $+2 \cdot 10^{-7}$ к и $-2 \cdot 10^{-7}$ к.

Δ 20-19. Тонкий стержень равномерно заряжен зарядом $q=60$ ед. заряда СГС. Определить напряженность в точке, отстоящей от концов стержня на расстоянии $R=20$ см, а от середины стержня на расстоянии $R_0=15$ см.

□ 20-20. Кольцо радиусом $R=5$ см из тонкой проволоки равномерно заряжено 50 ед. заряда СГС. Определить: а) напряженность поля в центре кольца; б) напряженность в точке, находящейся на перпендикуляре к плоскости кольца, восстановленном из центра кольца, и отстоящей от него на расстоянии $h=10$ см; в) максимальную напряженность на этом перпендикуляре.

□ 20-21. Круглая пластинка радиусом $a=8$ см равномерно заряжена электричеством с плотностью $\sigma=5$ ед. заряда СГС на 1 см^2 .

а) Определить напряженность поля в точке, лежащей на расстоянии $b=6$ см от пластинки на перпендикуляре к плоскости пластинки, проходящем через ее геометрический центр.

б) Показать, что полученная формула переходит в формулу напряженности поля бесконечной заряженной плоскости ($E=2\pi\sigma$), если $b \rightarrow 0$, и в формулу для напряженности поля точечного заряда, если $b \gg a$.

□ 20-22. Плоскость равномерно заряжена электричеством с плотностью σ . В середине плоскости имеется круглое отверстие, радиус которого a мал по сравнению с размерами плоскости. Найти напряженность поля в точке, лежащей на перпендикуляре к плоскости, проходящем через центр отверстия на расстоянии b от плоскости.

Указание. Решить эту задачу после задачи 20-21.

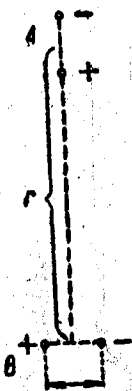


Рис. 20-3.

□ 20-23. Полусфера равномерно заряжена электричеством, причем на единице поверхности находится заряд σ . Определить напряженность поля в центре полусферы.

○ 20-24. Металлический шар радиусом 2 см окружен сферической металлической оболочкой радиусом 4 см, концентрической с шаром. На шаре находится заряд $+2 \cdot 10^{-8}$ К, на оболочке — заряд $-4 \cdot 10^{-8}$ К. Определить напряженность поля на расстоянии: а) 3 см и б) 5 см от центра шара.

○ 20-25. Плоский слой диэлектрика ($\epsilon=2$ СГС) толщиной 0,5 см равномерно заряжен электричеством, причем 1 см³ слоя имеет заряд 0,8 СГС. Какова напряженность поля: а) в середине слоя? б) внутри слоя на расстоянии 0,1 см от поверхности? в) вне слоя?

○ 20-26. Шарик ($R=2$ см), сделанный из диэлектрика, заряжен электричеством с объемной плотностью 0,7 СГС. Какова напряженность поля на расстоянии 3 см от центра шара?

△ 20-27. Начертить (примерно) графики, показывающие, как меняется напряженность поля в зависимости от расстояния в следующих случаях:

а) Поле двух плоскостей, заряженных противоположными зарядами (плоский конденсатор). По оси абсцисс — расстояния x от какой-либо точки слева от плоского конденсатора, отсчитываемые вправо.

б) Поле сферического конденсатора радиусами R_1 и R_2 . Внутренний шар заряжен положительно. По оси абсцисс — расстояния r от центра.

в) Поле слоя диэлектрика, заряженного с постоянной объемной плотностью. По оси абсцисс — расстояния от какой-либо точки слева от слоя, отсчитываемые вправо.

г) Поле шара из диэлектрика, заряженного с постоянной объемной плотностью. По оси абсцисс — расстояние от центра шара.

§ 21. Потенциал

1) Работа переноса заряда q в электрическом поле из точки 1 в точку 2

$$A = qU,$$

где U — разность потенциалов между точками 1 и 2.

2) Напряженность как градиент потенциала

$$U = - \int_1^2 E_n dn \quad (E_n = - \frac{dU}{dn}).$$

3) Потенциал поля точечного заряда и поля вне равномерно заряженного шара

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon' R} \quad (U = \frac{q}{\epsilon R}).$$

При наличии многих точечных зарядов

$$U = \sum \frac{q}{4\pi\epsilon' R} \quad (U = \sum \frac{q}{\epsilon R}).$$

4) Разность потенциалов (напряжение) в плоском, цилиндрическом и сферическом конденсаторах:

$$U = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} d \quad (U = \frac{\sigma}{\epsilon'} d);$$

$$U = \frac{2\gamma}{\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1}; \quad (U = \frac{\gamma \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi\epsilon'}).$$

$$U = \frac{q}{\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad [U = \frac{q}{4\pi\epsilon'} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)].$$

○ 21-1. Начертить расположение эквипотенциальных поверхностей в случаях следующих полей:

а) Одна проводящая плоскость снабжена острием (рис. 21-1). Другая плоскость расположена параллельно ей.

б) Между двумя параллельными проводящими плоскостями помещен незаряженный проводящий шарик (рис. 21-2).

в) Изолированный заряженный шар соединен проводником со стержнем электрометра (рис. 21-3).

Во всех случаях одно из тел имеет потенциал нуль (заземлено), а другое — потенциал 400 в. Требуется начертить эквипотенциальные поверхности, соответствующие потенциалам 100, 200 и 300 в.

○ 21-2. а) Могут ли силовые линии электрического поля (в той его части, где отсутствуют электрические заряды и где напряженность поля не равна нулю) пересекаться между собой? б) пересекаться или соприкасаться эквипотенциальные поверхности (соответствующие различным потенциалам)?

△ 21-3. Принимая положение, что в электрическом поле работа передвижения заряда по замкнутому полю равна нулю, за исходное, вывести из него следующие следствия:

а) Если силовые линии прямые и параллельны между собой,

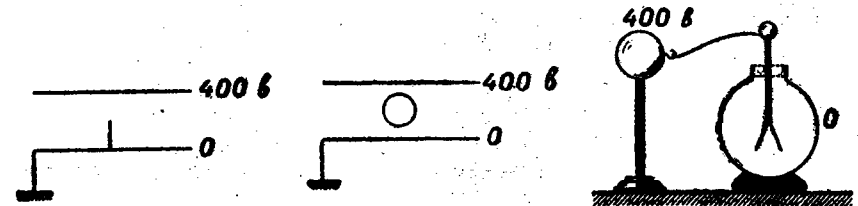


Рис. 21-1.

Рис. 21-2.

Рис. 21-3.

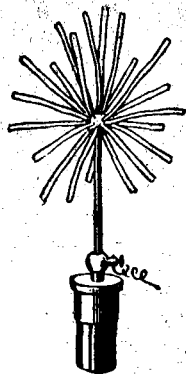


Рис. 21-4.

то густота их расположения всюду постоянна (т. е. поле однородно).

б) Если силовые линии представляют дуги концентрических окружностей, то напряженность поля обратно пропорциональна радиусу круга и не меняется при передвижении вдоль силовой линии.

Δ 21-4. На рисунке 21-4 изображен «султан» для опытов по электростатике. При заряджении султана бумажные ленты располагаются, как показано на рисунке, т. е. их расположение соответствует силовым линиям поля заряженного шара. Между тем бумажные ленты можно рассматривать как проводники, а их поверхности как эквипотенциальные поверхности. Выяснить суть дела.

Δ 21-5. Энергию отдельных частиц часто выражают в электрон-вольтах (эв). 1 эв соответствует работе электрических сил при перемещении электрона между точками, потенциалы которых разнятся на 1 в. Выразить в электрон-вольтах:

- а) энергию электрона, летящего со скоростью $10^8 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$;
- б) среднюю энергию поступательного движения молекулы при 0°C ;
- в) разность средней энергии молекул водяного пара и воды при $17,2^\circ \text{C}$;
- г) работу удаления молекулы азота с поверхности Земли в бесконечность.

○ 21-6. Сколько электронов содержит заряд пылинки массой 10^{-11} г , если она удерживается в равновесии в плоском конденсаторе с расстоянием между пластинами 5 мм, заряженными до разности потенциалов 76,5 в?

Δ 21-7. Между двумя плоскими параллельными вертикальными пластинками, отстоящими на 0,5 см, равномерно падает капля ($m = 10^{-9} \text{ г}$). При наложении на пластинки разности потенциалов $U = 400 \text{ в}$ капля падает под углом $72^\circ 25'$ к вертикали. Предполагая, что скорость капли пропорциональна действующей на нее силе, определить находящийся на ней заряд.

Δ 21-8. Две пластинки ($S = 2 \text{ дм}^2$) находятся в керосине на расстоянии $d = 4 \text{ мм}$ друг от друга. С какой силой они взаимодействуют, если они заряжены до разности потенциалов $U = 150 \text{ в}$?

○ 21-9. В каком случае сила взаимодействия двух заряженных пластинок: а) прямо пропорциональна электрической проницаемости среды? б) обратно пропорциональна ей?

○ 21-10. Шарик, радиус которого равен 1 см, заряжен $q = 10 \text{ СГС}$. Начертить в натуральную величину сечения эк-

випотенциальных поверхностей, соответствующих потенциалам 10, 8, 6, 4 и 2 СГС, плоскостью, проходящей через центр шара.

○ 21-11. Определить работу электрических сил при перенесении заряда $q = 3 \text{ СГС}$: а) из точки А в точку В (рис. 21-5) и б) из точки С в точку D, если $r = 6 \text{ см}$, $a = 8 \text{ см}$, $q_1 = +10 \text{ СГС}$ и $q_2 = -10 \text{ ед. заряда СГС}$.

Те же вопросы при $q_1 = q_2 = 10 \text{ ед. заряда СГС}$.

Δ 21-12. По вершинам правильного шестиугольника со стороной 5 см расположены равные точечные заряды $6,6 \cdot 10^{-9} \text{ к}$.

а) Определить работу электрических сил при перенесении заряда $3,3 \cdot 10^{-9} \text{ к}$ из центра шестиугольника в середину одной из его сторон. б) Чему равна эта работа, если заряды равны между собой по абсолютной величине, но соседние заряды противоположны по знаку?

Δ 21-13. Кольцо радиусом $R = 5 \text{ см}$ из тонкой проволоки равномерно заряжено зарядом $q = 50 \text{ СГС}$. а) Определить потенциал точки, лежащей на перпендикуляре к плоскости кольца, как функцию расстояния h точки от плоскости кольца. б) Найти напряженность как градиент потенциала. в) Определить потенциал и напряженность в центре кольца и при $h = 10 \text{ см}$. Сравнить с результатом задачи 20-20.

□ 21-14. В задаче 20-21 определить потенциал как функцию расстояния b и вычислить напряженность как градиент потенциала.

□ 21-15. Вывести формулу для потенциала поля заряженного проводящего шара, рассматривая потенциал как сумму потенциалов зарядов на отдельных местах шара: а) для точки, лежащей на шаре; б) для точки внутри шара; в) для точки вне шара.

Δ 21-16. Начертить примерные графики зависимости потенциала точки поля от расстояния во всех случаях задачи 20-27. Потенциал точки, служащей началом отсчета расстояния, принять равным нулю.

Δ 21-17. Определить потенциалы точек, находящихся на расстояниях 3 и 5 см от центра шара, описанного в задаче 20-24.

□ 21-18. Разность потенциалов между длинными коаксиальными цилиндрами ($R_1 = 3 \text{ см}$ и $R_2 = 10 \text{ см}$), заряженными равными разноименными зарядами, равна $U = 450 \text{ в}$. Определить: а) заряд на единице длины цилиндров; б) плотность зарядов на каждом цилиндре; в) напряженность вблизи поверхности внутреннего цилиндра, на середине расстояния между цилиндрами и вблизи поверхности внешнего цилиндра.

□ 21-19. Накаленная нить радиолампы испускает электроны, которые под действием электрического поля ускоренно дви-

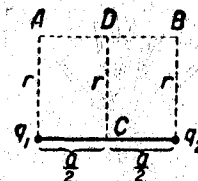


Рис. 21-5.

жуются к цилиндру, по оси которого натянута нить. Цилиндр и нить сделаны из одного и того же металла. Их диаметры равны соответственно 10 и 0,1 мм. Напряжение между цилиндром и нитью равно 91 в. Начальная скорость электронов мала. Определить ускорение и скорость электронов в точке, отстоящей от нити на расстоянии 3,5 мм.

Δ 21-20. На плоский воздушный конденсатор с толщиной воздушного слоя 1,5 см подается напряжение 39 кВ. Будет ли пробит конденсатор, если предельная напряженность в воздухе равна $30 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$? Будет ли пробит конденсатор, если внутрь его ввести параллельно стенкам стеклянную пластинку толщиной 0,3 см? Предельная напряженность для стекла $100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$.

Δ 21-21. Цилиндрический конденсатор имеет два диэлектрика с электрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 и с предельными напряженностями E_1 и E_2 . Чтобы наиболее рационально использовать материал, желательно, чтобы напряженность поля достигала значения, соответствующего пробоем в обоих диэлектриках одновременно. При каком соотношении между радиусами цилиндров диэлектриков это будет иметь место?

□ 21-22. а) Цилиндрический конденсатор имеет два слоя диэлектриков. Первый слой — бумага, пропитанная лаком ($\epsilon_1=4$ СГС), его внутренний радиус $r_1=2$ см, внешний $r_2=2,3$ см. Второй слой — стеклянный ($\epsilon_2=7$ СГС, $r_2=2,3$ см, $r_3=2,5$ см). Где будет пробит конденсатор, если напряжение постепенно повышать: в бумаге или стекле? При каком напряжении U_{max} будет пробит конденсатор? Предельная напряженность для бумаги $E_{1\text{max}}=120 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, а для стекла $E_{2\text{max}}=100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$.

б) Решить ту же задачу для случая обратного расположения слоев диэлектриков (внутри стекло толщиной 2 мм, снаружи бумага, пропитанная лаком, толщиной 3 мм).

□ 21-23. Между двумя длинными параллельными проволоками, протянутыми на расстоянии $l=15$ см друг от друга, поддерживается разность потенциалов $U=1500$ в. Радиус проволок $r=1$ мм. Определить напряженность поля: а) в точке, лежащей на середине расстояния между проволоками; б) в точке, отстоящей от одной из проволок на расстоянии $R_1=30$ см, от другой на расстоянии $R_2=25$ см.

Δ 21-24. Слой диэлектрика толщиной $d=5$ см равномерно заряжен с объемной плотностью $\rho=0,02$ СГС. Найти разность потенциалов между поверхностью слоя и его серединой ($\epsilon=3$ СГС).

Δ 21-25. В вакууме расположены, как показано на рисунке 21-6, два цилиндра А и В. Цилиндр В имеет высокий положительный потенциал; потенциал цилиндра А близок к нулю. Внутри цилиндра летят расходящимся пучком электроны. Как

действует на летящие электроны электрическое поле между цилиндрами А и В?

Δ 21-26. Электрон, энергия которого соответствует разности потенциалов U_0 , попадает в вакууме в поле цилиндрического конденсатора (радиусы цилиндров R_1 и R_2); направление скорости электрона в начальный момент перпендикулярно к плоскости, проходящей через ось конденсатора. При каком напряжении (U) между обкладками конденсатора электрон будет лететь внутри конденсатора по окружности?

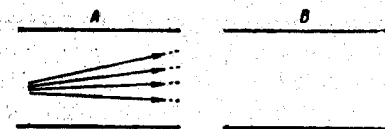


Рис. 21-6.

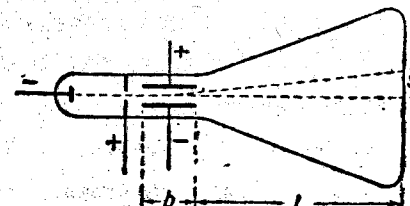


Рис. 21-7.

Δ 21-27. Узкий поток электронов в вакууме пролетает сквозь плоский конденсатор параллельно его пластинкам (рис. 21-7) и заставляет светиться флуоресцирующий экран, отстоящий от конца конденсатора на расстоянии $l=15$ см. При наложении на конденсатор напряжения $U=50$ в светящееся пятно на экране смещается на $s=21$ мм. Расстояние между пластинками конденсатора $d=18$ мм; длина конденсатора $b=6$ см. Определить скорость электрона.

Δ 21-28. Поток электронов, получивших свою скорость под действием напряжения, равного $U_1=5000$ в, влетает в середину между пластинками плоского конденсатора. Какое самое меньшее напряжение нужно наложить на конденсатор, чтобы электроны не вылетали из него, если размеры конденсатора таковы: длина конденсатора $b=5$ см; расстояние между пластинками $d=1$ см?

□ 21-29. Электрон, движущийся со скоростью $v_0=40\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$, влетает в пространство между двумя пластинками. Длина пластинок конденсатора $b=6$ см; расстояние между пластинками $d=0,5$ см. На конденсатор наложено напряжение $U=40$ в. На сколько увеличится скорость электрона по выходе его из конденсатора по сравнению с начальной?

§ 22. Проводники в электрическом поле

См. введения к § 20 и 21.

○ 22-1. Четыре проводящие пластинки расположены, как показано на рисунке 22-1, параллельно друг другу на равных расстояниях. Пластины А и В расположены на расстоянии d , заряжены до напряжения U , после чего отсоединены от источ-

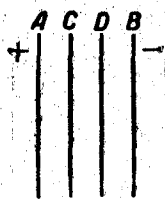


Рис. 22-1.

ника напряжения. Пластины C и D не заряжены.

а) Каково напряжение между A и C , C и D , D и B ? Какова напряженность поля в пространствах между пластинками?

б) Те же вопросы, после того как пластинки C и D соединяются проводником и вновь разъединяются.

в) Те же вопросы, если после манипуляций, описанных в пункте б), пластинки A и B соединяются проводником и вновь разъединяются.

г) Как изменяются ответы на вопросы а), б) и в), если при первых двух положениях пластинки A и B будут поддерживаться при постоянном напряжении, а при третьем положении будут сначала отключены от источника напряжения и лишь потом соединены проводником?

○ 22-2. Металлическое тело помещено между пластинками заряженного плоского конденсатора. На поверхности тела образуются вследствие электризации через влияние положительный и отрицательный заряды. После этого пространство между пластинками заполняется керосином. Изменяется ли величина наведенных на теле зарядов в случаях: а) заряд конденсатора остается неизменным? б) напряжение на конденсаторе поддерживается неизменным?

○ 22-3. Два равных разноименных точечных заряда расположены на неизменном расстоянии друг от друга. Как изменяется сила, действующая на заряды, и напряженность поля в различных точках в следующих случаях:

а) оба заряда окружают тонкими металлическими изолированными оболочками, совпадающими с эквипотенциальными поверхностями?

б) эти оболочки соединяют проводником?

Δ 22-4. Маленький шарик, заряженный $q = 1 \cdot 10^{-8}$ Кл, находится на расстоянии $a = 3$ см от плоской металлической стенки, отведенной к земле. С какой силой они взаимодействуют?

Δ 22-5. Показать, что работа при удалении точечного заряда от равного разноименного заряда в бесконечность в 4 раза больше работы удаления того же заряда в бесконечность от бесконечной проводящей стенки, расположенной на таком же расстоянии.

Δ 22-6. а) Точечные заряды $q_1 = +2 \cdot 10^{-9}$ Кл и $q_2 = +1 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся на расстоянии $d_1 = 4,6$ см друг от друга. Между ними на равных от них расстояниях помещена проводящая, отведенная к земле пластина толщиной $d_2 = 2$ см. Поверхности пластины перпендикулярны к прямой, соединяющей заряды. Определить силу, действующую на пластину.

б) Как изменится ответ, если один из зарядов заменить равным ему по величине отрицательным зарядом?

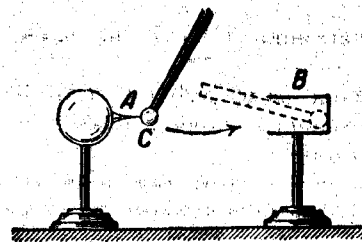


Рис. 22-2.

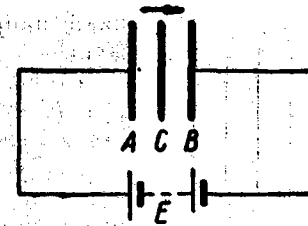


Рис. 22-3.

Δ 22-7. Небольшое облако с зарядом $q = 20$ Кл находится на высоте $h = 1$ км над поверхностью Земли. Считая Землю проводником, определить напряженность поля, создаваемую этим зарядом на расстоянии $s = 3$ км от места, над которым находится заряд. Кривизной поверхности Земли пренебречь.

□ 22-8. Точечный заряд $q = 5$ СГС находится на расстоянии $a = 3$ см от металлической стенки, отведенной к земле. Найти поверхностную плотность наведенного заряда на стенке: а) в точке, ближайшей к заряду q ; б) в точке, находящейся на расстоянии $r = 5$ см от заряда; в) определить общую величину заряда, индуцированного на поверхности стенки.

○ 22-9. В установках для улавливания пыли пропускают воздух сквозь металлические трубы, по оси которых протягивается металлическая проволока. Между проволокой и трубой создают сильное электрическое поле, причем проволоке придают отрицательный потенциал, а труба заземляется.

Как будут вести себя пылинки: а) незаряженные? б) заряженные положительно или отрицательно?

Δ 22-10. Шар с острием A и полый стакан B (рис. 22-2), помещенные на изолирующих подставках, заряжены до одинакового положительного потенциала. Если касаться металлическим шариком C , помещенным на изолирующей ручке, поочередно острия A и внутренней поверхности стакана B , то заряд на шаре A будет уменьшаться, а на стакане B увеличиваться, и энергия этой системы увеличится. За счет какой работы увеличивается энергия системы?

Δ 22-11. Батарея гальванических элементов E питает установку, показанную на рисунке 22-3. Между металлическими пластинками A и B находится изолированная металлическая пластинка C , толщина которой значительно меньше расстояния AB . Пластинка C касается B , затем равномерно движется к A , касается ее, затем равномерно движется обратно к B и т. д. Промежутки времени, в течение которых пластинка C касается A и B (перезаряжается), равны $0,1$ сек. Промежутки времени, в течение которых пластинка C движется от A к B или обратно, равны $0,3$ сек. Заряд, переносимый пластинкой C , равен $3 \cdot 10^{-11}$ Кл. Начертить график тока, который идет по цепи.

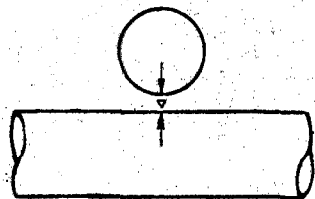


Рис. 22-4.

□ 22-12. Оси двух длинных металлических цилиндров образуют прямой угол (рис. 22-4). Расстояние между поверхностями цилиндров в точке наименьшего расстояния $\Delta = 0,1$ см. Радиусы цилиндров $R_1 = R_2 = R = 5$ см. Между цилиндрами поддерживается разность потенциалов $U = 300$ в. Определить силу взаимного притяжения цилиндров.

Указание. Использовать условие $\Delta \ll R$.

§ 23. Диэлектрики в электрическом поле

1) В диэлектрике

$$D = \epsilon_0' E + P \quad (D = E + 4\pi P),$$

где P — электрическая поляризация,

$$P = k' E \quad (P = kE).$$

Здесь $k' = 4\pi\epsilon_0'k$ есть коэффициент электризации. Очевидно,

$$\epsilon' = \epsilon_0' + k' \quad (\epsilon = 1 + 4\pi k).$$

2) Связь между поверхностной плотностью σ_1 фиктивных зарядов на границе диэлектрик — проводник и плотностью σ действительных зарядов на проводнике

$$\sigma_1 = \sigma \frac{\epsilon_0' - \epsilon'}{\epsilon'} \quad \left(\sigma_1 = \sigma \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right).$$

3) Скачок нормальной составляющей напряженности на границе двух диэлектриков определяется формулой

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_2'}{\epsilon_1'}.$$

4) Преломление силовых линий на границе раздела двух диэлектриков

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}.$$

○ 23-1. Определить коэффициент электризации стекла.

Δ 23-2. Определить плотность фиктивных зарядов на поверхностях слюдяной пластинки толщиной 0,2 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, заряженном до напряжения 400 в.

Δ 23-3. У поверхности фарфора напряженность поля в воздухе 200 $\frac{в}{см}$. Направление поля образует с нормалью к поверх-

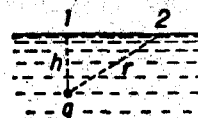


Рис. 23-1.

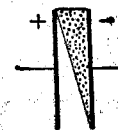


Рис. 23-2.

ности угол 40° . Определить: а) угол между направлением поля и нормалью в фарфоре; б) напряженность поля в фарфоре; в) плотность фиктивных зарядов на границе фарфор — воздух.

□ 23-4. В керосине на глубине $h = 3$ см от свободной поверхности находится точечный заряд $q = +50$ ед. СГС (рис. 23-1). Определить плотность фиктивных зарядов на поверхности керосина: а) над зарядом и б) на расстоянии $r = 5$ см от заряда; в) определить общую величину фиктивного заряда на поверхности керосина.

○ 23-5. Начертить приблизительное расположение линий индукции и эквипотенциальных поверхностей (отличающихся на постоянную разность потенциалов) в следующих случаях:

1) Металлический шарик, заряженный положительно, наполовину погружен в керосин.

2) Между двумя пластинками заряженного плоского конденсатора помещен, как показано на рисунке 23-2, клин из парафина.

Δ 23-6. Две горизонтально расположенные пластинки заряжены $+2 \cdot 10^{-7}$ к и $-2 \cdot 10^{-7}$ к. Пластинки расположены так близко, что поле между ними можно считать однородным.

Нижняя пластинка погружена в жидкий диэлектрик ($\epsilon = 3$ ед. СГС). Площадь пластинок 300 $см^2$. Определить силы, действующие на каждую из пластинок и на поверхность жидкости.

§ 24. Электроемкость

1) Заряд конденсатора емкостью C при напряжении U

$$q = CU.$$

2) Емкость плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов

$$C = \frac{\epsilon' S}{d} \quad \left(C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \right);$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon' l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad \left(C = \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \right)$$

$$C = \frac{4\pi\epsilon'}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} \quad \left(C = \frac{4\pi\epsilon'}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} \right).$$

Изолированный шар можно рассматривать как шаровой конденсатор, у которого $R_2 \rightarrow \infty$.

3) Параллельное и последовательное соединения конденсаторов

$$C = \sum C_i; \quad C' = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_i}}.$$

4) Энергия заряженного конденсатора

$$\mathcal{E} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

5) Плотность энергии электрического поля

$$W = \frac{\epsilon' E^2}{2} \quad \left(W = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} \right).$$

○ 24-1. Существуют диэлектрики, электрическая проницаемость которых зависит от напряженности поля (например, у сегнетовой соли). Имеет ли место у конденсаторов, у которых изолирующим слоем служат такие вещества, пропорциональность между разностью потенциалов и зарядом конденсатора?

○ 24-2. До какого напряжения надо зарядить телефонный конденсатор емкостью 2 мкф, чтобы на нем находился такой же заряд, как на лейденской банке, емкостью 900 см, заряженной до напряжения 30 000 в?

△ 24-3. а) Показать, что при малой толщине изолирующего слоя емкость шарового конденсатора можно рассчитывать по формуле емкости плоского конденсатора.

б) Провести то же доказательство для цилиндрического конденсатора.

Принять во внимание, что $\ln(1+x) = x$, если $x \ll 1$.

○ 24-4. Лейденская банка имеет следующие размеры: наружный диаметр дна 15 см; высота обкладок 20 см; толщина стекла 2 мм. Определить емкость ее (пользуясь формулой плоского конденсатора).

△ 24-5. Два проводящих шарика различного диаметра приводятся в соприкосновение и заряжаются. Затем они отводятся на значительное расстояние. Имеют ли они при этом одинаковые потенциалы?

○ 24-6. Конденсатор состоит из трех полосок станиоля, площадью по 6 см² каждая, разделенных двумя слоями слюды по 0,1 мм толщиной. Крайние полоски станиоля соединены между собой. Какова емкость такого конденсатора?

□ 24-7. Два одинаковых металлических диска диаметром 12 см расположены параллельно друг другу и разделены парафинированной бумагой толщиной 0,2 мм. Диски сдвинуты так, что центр одного из них находится против края другого (рис. 24-1). Определить емкость такой системы.

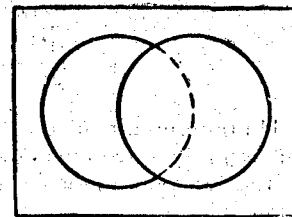


Рис. 24-1.

△ 24-8. Вследствие повреждения переменного конденсатора (рис. 24-2) с четным числом воздушных промежутков между пластинками все подвижные пластинки опустились настолько, что толщины соседних промежутков относятся как 1:2 (рис. 24-3). Как изменилась емкость конденсатора по сравнению с начальной, соответствующей тому же положению головки?

○ 24-9. Конденсатор из оловянной фольги с диэлектриком в виде листа парафинированной бумаги покрывают с одной стороны листком такой же бумаги и скручивают в трубку. Как изменится при этом емкость конденсатора?

△ 24-10. Пластины плоского конденсатора присоединены к источнику постоянного напряжения 300 в. Пластины сближаются со скоростью 1 $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$. Какой ток идет по подводящим

проводам в тот момент, когда пластины находятся на расстоянии 2 мм друг от друга? Площадь пластинок 400 см².

△ 24-11. Металлический шар ($R=3$ см) опущен наполовину в керосин. Какой находится в нем заряд, если он заряжен до 1800 в.

□ 24-12. а) Определить емкость конденсатора, состоящего из двух шариков диаметром $d=1$ см, центры которых находятся в воздухе на расстоянии $l=20$ см друг от друга, приняв, что заряды на их поверхностях распределены равномерно.

б) Определить емкость конденсатора, состоящего из тако-

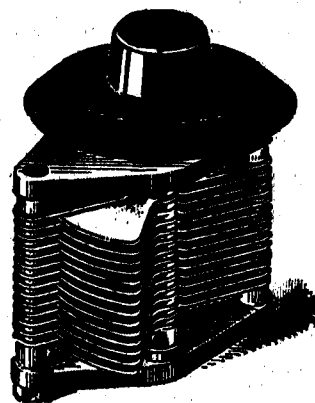


Рис. 24-2.

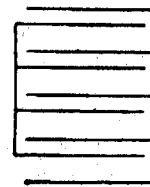


Рис. 24-3.

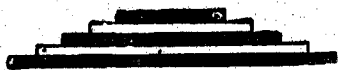


Рис. 24-4.

го же шарика и большой проводящей пластинки, отстоящей на расстоянии $l=20$ см от центра шарика. Сравнить с емкостью изолированного шарика такого же диаметра.

○ 24-13. Батарея из двух последовательно соединенных лейденских банок (300 и 500 пф) заряжена до напряжения 12 000 в. Определить:

- напряжение на первой и второй банках;
- количество электричества на обкладках.

△ 24-14. Кружки из металлической фольги и парафинированной бумаги, толщиной по 0,1 мм каждый и диаметрами 2, 3, 4, 5 и 6 см, наложены друг на друга, как показано на рисунке 24-4 (черным показаны металлические кружки). Определить емкость такой системы.

○ 24-15. Параллельно одному из 5 последовательно соединенных одинаковых конденсаторов подключен статический вольтметр, емкость которого в два раза меньше каждого из конденсаторов. Вольтметр показывает 500 в. Найти напряжение на всей батарее.

△ 24-16. Пробивное напряжение для прессшпана толщиной 1 мм равно 18 000 в. Два конденсатора с изолирующим слоем из такого прессшпана, один емкостью 1100 пф, другой емкостью 400 пф, соединены последовательно. Будет ли эта система пробита, если дать на нее напряжение 30 000 в?

△ 24-17. а) Каковы емкости батарей конденсаторов, соединенных по схемам, показанным на рисунках 24-5 и 24-6?

б) Показать, что емкости этих батарей равны, если выполняется условие $\frac{C_1}{C_3} = \frac{C_2}{C_4}$.

△ 24-18. Определить емкость плоского конденсатора с площадью обкладок $S=200$ см². Между обкладками находится стекло ($d_1=1$ мм), покрытое с обеих сторон слоем парафина (толщина каждого слоя $d_2=0,2$ мм).

□ 24-19. Определить емкости конденсаторов, описанных в задаче 21-22, если длины их равны 1 м.

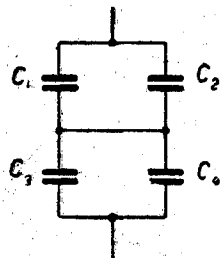


Рис. 24-5.

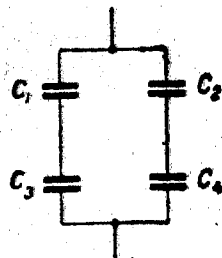


Рис. 24-6.

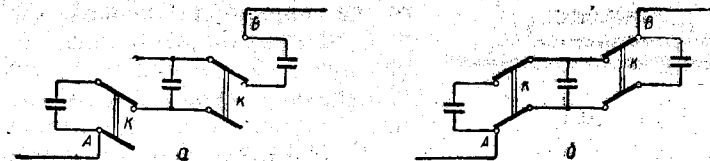


Рис. 24-7.

□ 24-20. а) Определить емкость конденсатора, состоящего из двух проволок, описанных в задаче 21-23, приняв длину проволок равной 9 км.

б) Как изменится емкость системы, описанной в а), если одну из проволок заменить отведенной к земле широкой металлической пластиной той же длины? Направление пластины перпендикулярно к плоскости, в которой расположены проволоки.

○ 24-21. Лейденская банка емкостью 3000 см заряжена до 20 000 в. Предполагая, что при разряде 10% энергии рассеется в виде звуковых и электромагнитных волн, определить количество теплоты.

△ 24-22. а) Батарея из n последовательно соединенных конденсаторов заряжается и при помощи переключателя КК, показанного на рисунках 24-7, а и б, без изменения зарядов на конденсаторах переводится в параллельное соединение. Как изменится при этом энергия батареи и какова будет работа разряда батарей если: 1) емкости конденсаторов одинаковы? 2) емкости конденсаторов различны?

б) Те же вопросы в случае, если батарея заряжается при параллельном соединении и затем переводится в последовательное.

△ 24-23. Имеется система конденсаторов, соединенных по произвольной схеме, внутри которой поставлен ключ К (пример такой схемы показан на рисунке 24-8). Увеличится или уменьшится емкость системы, если замкнуть ключ К?

△ 24-24. Плоский конденсатор имеет в качестве изолирующего слоя стеклянную пластинку толщиной $d=2$ мм и площадью $S=300$ см². Конденсатор заряжен до напряжения $U=100$ в, после чего отключен от источника напряжения. Определить механическую работу, которую нужно произвести, чтобы вынуть стеклянную пластинку из конденсатора (трение в расчет не принимать).

△ 24-25. Пластины воздушного конденсатора имеют площадь 300 см² и отдалены друг от друга на расстоянии 3 мм. Между ними находится металлическая пластинка с такой же площадью толщиной 1 мм, изолированная от

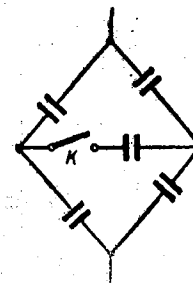


Рис. 24-8.

земли. Конденсатор заряжен до напряжения 600 в и отсоединен от источника напряжения. Какую работу надо произвести, чтобы вытащить пластинку?

○ 24-26. В чем состоит различие в явлениях в следующих случаях:

а) емкость конденсатора уменьшают (раздвиганием пластин или выдвиганием диэлектрика) при сохранении величины заряда (т. е. отсоединив от источника тока)?

б) емкость конденсатора уменьшают при сохранении напряжения (т. е. не отсоединяя от источника тока)?

△ 24-27. Внутренняя обкладка заряженной лейденской банки соединяется с внутренней обкладкой такой же незаряженной банки, причем заряд поровну распределяется на обеих банках. Показать, что энергия заряда убывает вдвое, и объяснить это.

△ 24-28. Воздушный конденсатор заряжается до некоторого напряжения и в заряженном состоянии заливается керосином, отчего энергия конденсатора уменьшается в $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ раз. Куда исчезает остальная энергия?

○ 24-29. Электрические проницаемости веществ заметно изменяются при повышении температуры (обычно убывают). Предположим, что заряженный конденсатор охлаждается, вследствие чего его электрическая энергия изменяется (например, убывает). Куда исчезает энергия?

△ 24-30. Две лейденские банки ($C_1=600$ нф и $C_2=1000$ нф) соединены последовательно. Батарею заряжают до напряжения $U=20$ кв. Затем банки, не разряжая, соединяют параллельно. Определить работу разряда, который происходит при этом соединении.

△ 24-31. Два одинаковых воздушных конденсатора ($C=800$ см) заряжены до напряжения $U=900$ в. Один из конденсаторов погружается в заряженном состоянии в керосин, после чего конденсаторы соединяются параллельно. Определить работу происходящего при этом разряда.

△ 24-32. Одна лейденская банка ($C_1=600$ нф) заряжена до напряжения $U_1=3000$ в, другая банка ($C_2=800$ нф) — до напряжения $U_2=-4000$ в. Определить работу разряда при соединении их внутренних обкладок.

□ 24-23. Емкость конденсатора, изображенного на рисунке 24-2, меняется в пределах от $C_1=700$ см ($\alpha=0$) до $C_2=20$ см ($\alpha=\pi$). Определить вращающие моменты электрических сил при углах $\alpha=0$, $\alpha=\frac{\pi}{2}$, $\alpha=\pi$.

а) Вращение головки конденсатора производится после того, как конденсатор при $\alpha=0$ заряжен до $U=200$ в и отключен от источника напряжения.

б) Вращение головки конденсатора производится при присоединенном источнике напряжения ($U=200$ в).

□ 24-34. Батарея из $n=5$ последовательно соединенных лейденских банок, каждая емкостью $C=400$ см, поддерживается при постоянном напряжении $U=60000$ в. Одна из банок пробивается. Определить: а) изменение энергии батареи банок; б) работу разряда; в) работу источника напряжения.

△ 24-35. Принимая протон и электрон, из которых состоит атом водорода, за точечные заряды, находящиеся на расстоянии $5 \cdot 10^{-9}$ см, найти плотность энергии электрического поля на середине расстояния между ними.

△ 24-36. На проводящем шаре диаметром 6 см находится заряд $2 \cdot 10^{-8}$ к. Шар погружен в керосин и расположен на значительном расстоянии от стенок сосуда. Определить плотность энергии электрического поля в точках, отстоящих от центра шара на расстояниях: а) 2 см; б) 4 см.

□ 24-37. Заряд q равномерно распределен по объему шара радиусом R . Принимая электрическую проницаемость вещества шара и окружающей среды равной ϵ_0 , определить:

а) энергию электрического поля внутри шара;

б) вне шара;

в) во всем пространстве;

г) изменение энергии при делении заряженного шара на два равных заряженных шара.

§ 25. Закон Ома

1) Связь между количеством электричества q , током I и временем τ

$$I = \frac{dq}{d\tau}.$$

В случае, если ток не меняется с течением времени

$$I = \frac{q}{\tau}.$$

2) Плотность тока

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S},$$

где ΔI — ток, проходящий сквозь сечение провода ΔS . В случае, если плотность по всему сечению S проводника одинакова,

$$j = \frac{I}{S}.$$

3) Сопротивление проводов длины l с постоянным сечением S

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

где ρ — удельное сопротивление материала.

Для подсчета сопротивления тела с переменным сечением нужно прибегать к интегрированию.

4) Зависимость удельного сопротивления от температуры t

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

где α — температурный коэффициент сопротивления; ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C .

5) Закон Ома

$$I = \frac{U + \Sigma \varepsilon}{\Sigma R},$$

где U — напряжение на концах участка цепи, содержащем электродвижущие силы, сумма которых $\Sigma \varepsilon$, ΣR — сумма сопротивлений всех частей участка. Для полной цепи $U = 0$.

6) Связь между напряженностью поля E и плотностью тока j

$$j = gE,$$

где $g = \frac{1}{\rho}$ — удельная проводимость.

7) Предполагается, что гальванические элементы, упомянутые в задачах § 25—27, являются неполяризующимися.

○ 25-1. Какое количество электричества переносится в следующих случаях: а) ток равномерно возрастает от нуля до 3 а в течение 10 сек; б) ток убывает от 18 а до нуля, причем за каждые 0,01 сек он убывает вдвое?

○ 25-2. Какова плотность тока в волоске калильной лампы, если ток 0,125 а и диаметр волоска 0,019 мм?

△ (25-3). В электронной лампе ток идет от металлического цилиндра к накаливающей нити, расположенной по его оси. Определить плотность тока вблизи цилиндра и вблизи нити при таких условиях: ток 3 ма; длина нити и цилиндра 2,5 см; диаметр нити 0,02 мм; диаметр цилиндра 1 см.

○ 25-4. Требуется устроить реостат на 0,2 ом. Материал — никелиновая лента толщиной 0,5 мм и шириной 10 мм. Какую длину ленты надо взять?

○ 25-5. Имеется моток медной проволоки с площадью поперечного сечения 0,1 мм². Масса всей проволоки 0,3 кг. Определить сопротивление проволоки.

△ 25-6. Предположим, что в неограниченной среде, удельное сопротивление которой равно $\rho = 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$, находится металлический шар диаметром $d = 10 \text{ см}$. Каково сопротивление системы шар — неограниченная среда? (Таково же приблизительно сопротивление заземления, выполненного в виде шара

такого же диаметра, закопанного в почву с указанным удельным сопротивлением.)

○ 25-7. Следует ли при расчете сопротивления проводов при температурах, отличных от 0°C , принимать во внимание изменение их геометрических размеров при нагревании?

○ 25-8. Вольфрам имеет положительный, а уголь отрицательный температурный коэффициент. Каково различие ламп с вольфрамовым и с угольным волоском: а) в отношении изменения тока при включении? б) в отношении распределения плотности тока в накаливаемом волоске?

○ 25-9. Обмотка электромагнитов в динамо-машине сделана из медного провода и при температуре 10°C имеет сопротивление 14,2 ом. После работы сопротивление обмотки повысилось до 16,5 ом. Какова при этом температура обмотки?

△ 25-10. Определить температурный коэффициент провода, составленного из алюминиевой проволоки с сопротивлением 3 ом и железной проволоки с сопротивлением 2 ом, соединенных последовательно.

△ 25-11. Угольный стержень соединен последовательно с железным такой же толщины. При каком соотношении их длин сопротивление такой комбинации не зависит от температуры?

△ 25-12. Рабочая катушка в вольтметре медная, а добавочное сопротивление сделано из манганина, удельное сопротивление которого почти не зависит от температуры. Пружинка, противодействующая вращению катушки, сделана из фосфористой бронзы. Температурный коэффициент модуля упругости фосфористой бронзы равен $\beta = -0,0004 \text{ град}^{-1}$. При каком соотношении между сопротивлениями рабочей катушки R_1 и добавочным сопротивлением R_2 показания вольтметра не зависят от температуры?

○ 25-13. В установке, изображенной на схеме (рис. 25-1), емкость конденсатора C_1 в два раза больше емкости конденсатора C_2 , а сопротивление R_1 в три раза больше сопротивления R_2 . Сопротивление батареи ничтожно мало, ее электродвижущая сила равна 60 в. Определить напряжения на конденсаторах в следующих случаях: а) ключи K_1 и K_2 замкнуты; б) ключ K_1 замкнут, K_2 разомкнут; в) ключ K_1 разомкнут, K_2 замкнут.

△ 25-14. Какое напряжение можно дать на катушку, имеющую $w = 1000$ витков медного провода, со средним диаметром витков $d = 6 \text{ см}$, если допустима плотность тока $j = 2 \text{ а/мм}^2$?

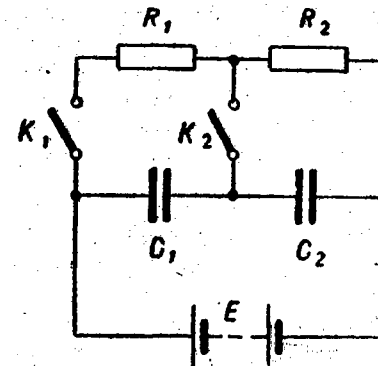


Рис. 25-1.

Δ 25-15. Если вольтметр соединить последовательно с сопротивлением $R=10\,000\text{ ом}$, то при напряжении $U_0=120\text{ в}$ он покажет $U_1=50\text{ в}$. Если соединить его последовательно с неизвестным сопротивлением R_x , то он при том же напряжении покажет $U_2=10\text{ в}$. Определить это сопротивление.

○ 25-16. Батарея из 50 последовательно соединенных элементов дает ток во внешнюю цепь, состоящую из железного провода длиной 20 км и с площадью сечения 3 мм² и аппарата с сопротивлением 90 ом. Э.д.с. и внутреннее сопротивление каждого из элементов равны 1,4 в и 0,4 ом. Определить силу тока.

○ 25-17. Под конец зарядки батареи-аккумуляторов током 3 а присоединенный к ней вольтметр показывал напряжение 4,25 в. В начале разрядки той же батареи током 4 а вольтметр показывал напряжение 3,9 в. Ток, проходящий по вольтметру, ничтожен. Определить э.д.с. и внутреннее сопротивление батареи.

○ 25-18. При токе 0,5 а напряжение на участке некоторой цепи равно 8 в. При токе 1,5 а напряжение на том же участке равно 20 в. а) Какова э.д.с., действующая на этом участке? б) Каково будет напряжение, если ток уменьшится до 0,1 а?

○ 25-19. Гальванический элемент дает на внешнее сопротивление 4 ом ток 0,2 а. Если же внешнее сопротивление 7 ом, то элемент дает ток 0,14 а. Какой ток он даст, если его замкнуть накоротко.

Δ 25-20. Два гальванических элемента с э.д.с., равными E_1 и E_2 , вольтметр с большим внутренним сопротивлением и шкалой, нуль которой находится на ее середине, и сопротивление R соединены по схеме, показанной на рисунке 25-2. Сопротивление R и внутренние сопротивления каждого из элементов равны между собой. При разомкнутом ключе K стрелка вольтметра отклоняется вправо. При каком соотношении между E_1 и E_2 стрелка вольтметра при замкнутом ключе K : а) отклонится вправо? б) остановится на нуле? в) отклонится влево?

Δ 25-21. Два гальванических элемента (1 и 2), два вольтметра с большими внутренними сопротивлениями и шкалами, нули которых находятся на их серединах, и сопротивление R соединены по схеме, показанной на рисунке 25-3, а. При разомкнутом ключе K вольтметры при 1-м и 2-м элементах пока-

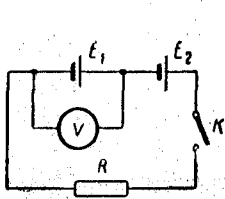


Рис. 25-2.

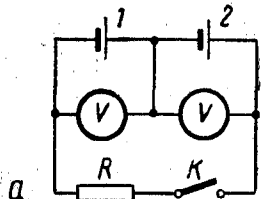
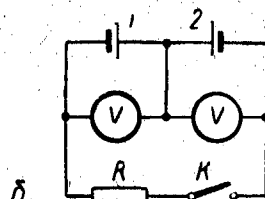


Рис. 25-3.



зывают напряжения 1,8 в и 1,4 в, причем их стрелки отклонены вправо. При замыкании ключа K вольтметры показывают напряжения 1,4 в и 0,6 в при том же направлении отклонения стрелок. Что будут показывать вольтметры, если соединить приборы по схеме 25-3, б и замкнуть ключ K ?

Δ 25-22. Несколько одинаковых гальванических элементов соединены, как показано на схеме (рис. 25-4), посредством проводов, сопротивление которых ничтожно мало.

а) Какова разность потенциалов между любыми точками соединительных проводов, например между точками A и B или между точками A и C ?

б) Тот же вопрос в случае, если э.д.с. элементов не равны и внутренние сопротивления прямо пропорциональны э.д.с.

в) Как изменится ответ на вопрос а), если элементы будут обращены друг к другу одноименными полюсами?

Δ 25-23. Какие заряды находятся на плоских электродах, опущенных в раствор медного купороса, если идет ток $I=0,5\text{ а}$ и если удельное сопротивление раствора равно $\rho=50\text{ ом}\cdot\text{см}$? Электрическую проницаемость раствора принять $\epsilon'=7,1\cdot 10^{-10}\frac{\Phi}{\text{м}}$

Δ 25-24. Силовые линии электрического тока в проводниках совпадают с линиями тока. Как это согласовать с тем фактом, что в тонком слое электролита (например, в плоской кюветке) линии тока от двух электродов в виде маленьких шариков расположены в этом слое, тогда как силовые линии двух разноименных зарядов располагаются по всем направлениям?

Δ 25-25. Ток идет по проводнику формы, показанной на рисунке 25-5. Одинакова ли напряженность поля в местах с узким и широким сечением? Чем это объяснить?

Δ 25-26. Каким образом расположены силовые линии внутри изогнутой стеклянной трубки с электролитом, по которому идет ток? Как идут силовые линии в проводе, завязанном узлом?

□ 25-27. (Предварительно решить задачу 21-23.) В растворе медного купороса ($\rho=40\text{ ом}\cdot\text{см}$) ток идет между двумя медными проволоками, оси которых расположены параллельно друг другу на расстоянии 13 см. Радиус проволоки 4 мм. Между проволоками поддерживается напряжение 12 в. Определить плотность тока: а) на середине расстояния между проволоками; б) в точке, отстоящей на 10 см от осей обеих проволок; в) определить ток, принимая, что длина проволок 15 см равна глубине слоя раствора и размеры сосуда весьма велики.

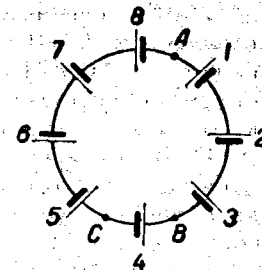


Рис. 25-4.



Рис. 25-5.

□ 25-28. Изолирующий слой плоского конденсатора состоит из двух слоев толщиной d_1 и d_2 с электрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Диэлектрики имеют удельные сопротивления ρ_1 и ρ_2 . Конденсатор находится под постоянным напряжением U .

а) Показать, что при установившемся состоянии в случае, если $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \neq \frac{\rho_2}{\rho_1}$, на границе диэлектриков должны находиться свободные заряды.

б) Вычислить величину этих зарядов (для стекла $\rho_1 = 2 \cdot 10^{13}$ ом·см; для керосина $\rho_2 = 5 \cdot 10^{14}$ ом·см), если $d_1 = d_2 = 3$ мм и если полное напряжение на конденсаторе $U = 15000$ в.

в) Объяснить, почему слоистые конденсаторы дают явление «остаточного заряда» (заряда, появляющегося спустя некоторое время по разрядке конденсатора).

△ 25-29. К конденсатору ($C = 10$ мкф) присоединяют аккумулятор с э. д. с. $E = 2$ в. через сопротивление $R = 1000$ ом. Через сколько времени конденсатор будет заряжен до напряжения $U = 1,98$ в? Внутреннее сопротивление аккумулятора ничтожно.

△ 25-30. Плоский конденсатор с диэлектриком в виде парафинированной бумаги ($\epsilon = 2$ СГС) через $t = 10$ мин сохранил заряд q , равный 0,1 первоначального заряда q_0 . Предполагая, что утечка произошла только сквозь парафинированную бумагу, вычислить ее удельное сопротивление.

§ 26. Разветвленные цепи

1) Сопротивление при параллельном соединении проводников

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}.$$

2) Правила Кирхгофа:

а) для суммы токов в узле

$$\sum I = 0;$$

б) для суммы произведений сил токов на сопротивления участков и суммы электродвижущих сил при обходе по контуру

$$\sum E = \sum IR.$$

3) Расчет сопротивления разветвленной цепи производится следующим образом. Входным точкам схемы приписывают потенциалы U_0, U_1 ; потенциалы внутренних точек ветвления токов принимают за неизвестные величины. Эти величины определяются из системы линейных уравнений

$$\sum \frac{U_i - U_k}{R_{ik}} = 0.$$

Искомое сопротивление пропорционально обратной величине суммы токов во входной точке

$$R = \left\{ \sum_k \frac{U_0 - U_k}{R_{0k}} \right\}^{-1} (U_0 - U_1).$$

4) Расчет разветвленной цепи с наличием в ней источников тока производится аналогично, но уравнение для определения неизвестных потенциалов точек ветвления токов имеет вид:

$$\sum_k \frac{U_i - U_k + E_{ik}}{R_{ik}} = 0.$$

○ 26-1. Потребитель имеет 20 лампочек с сопротивлением по 48 ом и 100 лампочек с сопротивлением по 288 ом каждая. Лампочки соединены параллельно. Определить сопротивление установки потребителя.

○ 26-2. Определить электрическое сопротивление сетки, показанной на рисунке 26-1, если сопротивление каждого из звеньев сетки равно 1 ом. Рассмотреть два случая: а) ток идет от точки А к точке В; б) ток идет от точки С к точке D.

△ 26-3. Требуется подобрать для схем, показанных на рисунках 26-2 и 26-3, такие сопротивления R , чтобы при замкнутом ключе K_1 и разомкнутом ключе K_2 амперметр показывал такой же ток, как при замкнутом ключе K_2 и разомкнутом ключе K_1 . Сопротивления источника тока и амперметра ничтожно малы.

○ 26-4. К гальванометру, сопротивление которого 290 ом, присоединили шунт, понижающий чувствительность гальванометра в 10 раз. Какое сопротивление надо включить последовательно с шунтированным гальванометром, чтобы общее сопротивление осталось неизменным?

△ 26-5. а) Сопротивление R измеряется вольтметром и амперметром по схеме, показанной на рисунке 26-4. Амперметр А показывает $I = 0,32$ а; вольтметр — $U = 9,6$ в. Сопротивление амперметра $R_A = 0,03$ ом. Определить относительную ошибку x , которую делают, вычисляя сопротивление без учета сопротивления амперметра.

б) Произвести тот же расчет при $I = 7$ а и $U = 2,1$ в.

△ 26-6. а) Сопротивление R измеряется вольтметром и амперметром по схеме, показанной на рисунке 26-5.

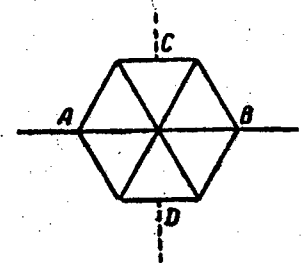


Рис. 26-1.

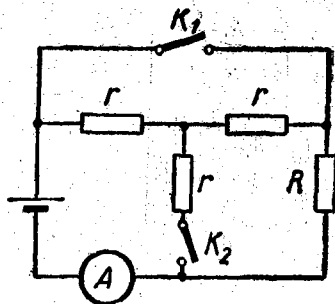


Рис. 26-2.

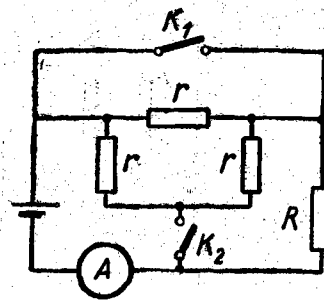


Рис. 26-3.

Амперметр A показывает $I=2,40$ а; вольтметр V — $U=7,20$ в. Сопротивление вольтметра $R_V=1000$ ом. Определить относительную ошибку x , которую делают, вычисляя сопротивление без учета тока, идущего в вольтметр.

б) Произвести тот же расчет при $I=24$ ма; $U=7,20$ в.

Δ 26-7. При включении приборов по схеме, показанной на рисунке 26-5, амперметр показывает ток $I_1=2,06$ а, а вольтметр — напряжение $U_1=49,6$ в. При включении тех же приборов по схеме на рисунке 26-4 амперметр показывает $I_2=1,94$ а, а вольтметр — $U_2=50$ в. Определить сопротивление R . Напряжение, даваемое батареей, является постоянным.

Δ 26-8. На рисунке 26-6 показана схема соединений катушки амперметра K и шунтов R_1 и R_2 . Если включить амперметр в цепь, пользуясь клеммами A и B , то цена деления циферблата амперметра равна $0,1$ а. Если пользоваться клеммами A и C , то цена деления равна $0,02$ а. Какова цена деления, если пользоваться клеммами B и C ?

Δ 26-9. На коробке амперметра, кроме клемм M и N для присоединения к цепи, имеются 4 клеммы, расположенные, как показано на рисунке 26-7. В паспорте прибора указано, что при соединении этих клемм перемычками по схеме I вся шкала ам-

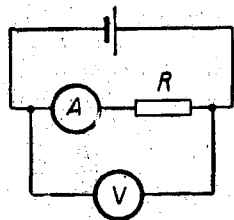


Рис. 26-4.

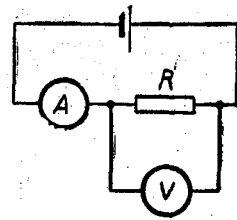


Рис. 26-5.

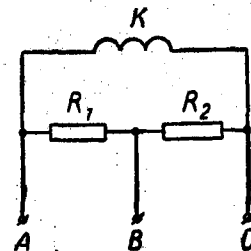


Рис. 26-6.

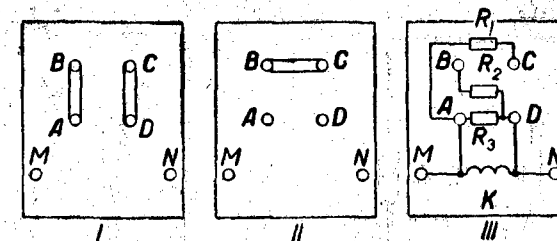


Рис. 26-7.

перметра соответствует 3 а; при соединении тех же клемм по схеме II вся шкала соответствует 1,5 а. Внутри прибора имеются сопротивления, соединенные с рабочей катушкой K прибора по схеме рисунка III , причем $R_1=R_2$.

а) Какому току будет соответствовать вся шкала, если удалить совсем перемычки между клеммами A , B , C и D ?

б) Каково должно быть отношение n между сопротивлениями R_1 и R_2 , если желательно, чтобы при удалении перемычек вся шкала соответствовала 1,2 а?

○ 26-10. Для определения места, где один из проводов двухжильного кабеля вследствие повреждения получил соединение с землей, можно употребить установку, схема которой приведена на рисунке 26-8. AB — струна, по которой можно передвигать контакт K . Определить место повреждения кабеля, если гальванометр G не дает отклонения, когда контакт K находится на расстоянии 41 см от конца B . Длина струны 100 см; длина кабеля 7,8 км.

□ 26-11. а) Чему равно сопротивление проволочного каркаса в виде прямоугольника со сторонами a и b и диагональю, если ток идет от точки A к точке B (рис. 26-9)? Сопротивление единицы длины проволоки равно γ .

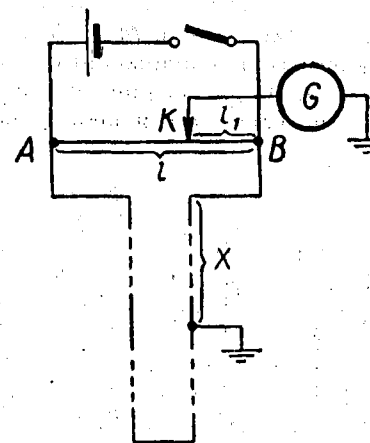


Рис. 26-8.

б) Тот же вопрос, если ток идет от точки C к D .

Δ 26-12. Человек, стоя на земле, касается оголенного места одного из проводов магистрали, между проводами

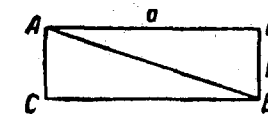


Рис. 26-9.

которой имеется напряжение $U=600$ в. Какой ток пройдет сквозь тело человека, если он прикоснется к одному из проводов при следующих условиях: сопротивление тела человека (главным образом кожи в месте прикосновения) в случае сухой кожи оценивается в $R=50\,000$ ом; сопротивление изоляции между тем проводом, к которому прикоснулись, и землей равно $R_1=50\,000$ ом, сопротивление изоляции между другим проводом и землей равно $R_2=400\,000$ ом? Сопротивлением земли можно пренебречь.

Δ 26-13. Для измерения сопротивления изоляции в проводах, находящихся под напряжением, измеряют посредством вольтметра с большим внутренним сопротивлением R напряжения: 1) между первым и вторым проводами (U); 2) между первым проводом и землей (U_1); 3) между вторым проводом и землей (U_2). Чему равны сопротивления изоляции первого и второго проводов по отношению к земле R_1 и R_2 при таких данных: $R=20\,000$ ом; $U=120$ в; $U_1=8$ в; $U_2=10$ в?

Δ 26-14. Два вольтметра с внутренними сопротивлениями 6000 ом и 4000 ом соединены последовательно. Параллельно к ним включено сопротивление $10\,000$ ом. На эту систему дано напряжение 180 в (рис. 26-10).

- Что показывают вольтметры, когда ключ K разомкнут?
- Каковы показания вольтметров, когда ключ K замкнут, а движок D соединен с серединой сопротивления R_3 ?
- Движок D двигают до тех пор, пока показания вольтметров не уравниваются между собой. На какие части делит движок D сопротивление R_3 ?

Δ 26-15. На рисунке 26-11 изображена схема потенциометра, при помощи которого можно менять напряжение U_1 , приходящее на прибор M . Потенциометр находится под напряжением U . Полагая сопротивление прибора M равным r и сопротивление потенциометра равным R , определить U_1 как функцию расстояния x ползунка потенциометра от одного из его концов.

Исследовать случаи: а) $x=0$; б) $x=l$; в) $x=\frac{l}{2}$; $r \gg R$.

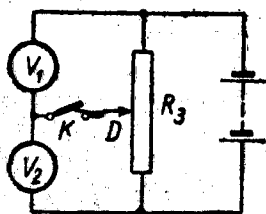


Рис. 26-10.

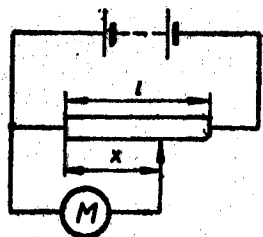


Рис. 26-11.

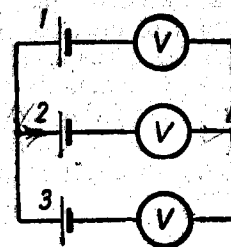


Рис. 26-12.

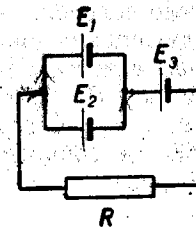


Рис. 26-13.

○ 26-16. Генератор постоянного тока дает э.д.с. 12 в. Его внутреннее сопротивление $0,2$ ом. Он заряжает батарею аккумуляторов с э.д.с. 10 в и внутренним сопротивлением $0,6$ ом. Параллельно батарее включена лампочка с сопротивлением 3 ом. Определить ток в батарее аккумуляторов и в лампочке.

○ 26-17. Три гальванических элемента с э.д.с. $1,3$ в; $1,4$ в и $1,5$ в и с внутренними сопротивлениями по $0,3$ ом каждый включены параллельно друг другу на внешнее сопротивление $0,6$ ом. Определить ток в каждом элементе.

○ 26-18. Три гальванических элемента и три вольтметра соединены по схеме, показанной на рисунке 26-12. Электродвижущие силы гальванических элементов равны: $E_1=1$ в; $E_2=2$ в; $E_3=1,5$ в. Сопротивления вольтметров равны: $R_1=2000$ ом; $R_2=3000$ ом; $R_3=4000$ ом. Сопротивления элементов ничтожно малы.

- Каковы показания вольтметров?
- Каково напряжение между узлами схемы?

○ 26-19. Каковы внутренние сопротивления гальванических элементов с электродвижущими силами $1,6$ в; $1,4$ в и $1,1$ в, если, будучи соединены параллельно при внешнем сопротивлении 1 ом, они дают токи $0,8$ а; $0,6$ и $-0,2$ а?

○ 26-20. Три гальванических элемента ($E_1=1,3$ в; $E_2=1,5$ в; $E_3=2$ в; $r_1=r_2=r_3=0,2$ ом) включены, как это показано на рисунке 26-13. Сопротивление $R=0,55$ ом. Определить токи I_1 , I_2 и I_3 в элементах.

Δ 26-21. На схеме, показанной на рисунке 26-14, сопротивления $R_1=R_2=R_3=R_4=1000$ ом, $E_1=1,5$ в, $E_2=1,8$ в. Определить токи в сопротивлениях.

Δ 26-22. Для измерений разности температур посредством термоэлемента иногда применяют схему, показанную на рисунке 26-15.

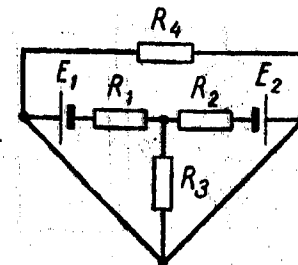


Рис. 26-14.

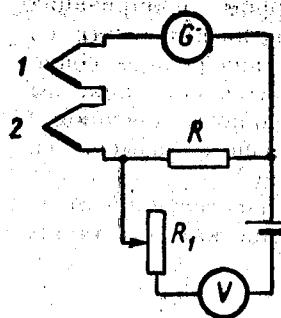


Рис. 26-15.

Меняя сопротивление высокоомного реостата R_1 , достигают того, что стрелка гальванометра G стоит на нуле. Определить разность температур Δt между спаями термоэлемента 1 и 2 при таких данных: $R=0,1$ ом, внутреннее сопротивление вольтметра $R_V=50$ ом; показание вольтметра при отсутствии тока в гальванометре равно $U=0,07$ в; коэффициент термоэлектродвижущей силы термоэлемента (медь — константан) равен $e=4,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{в}}{\text{град}}$.

Δ 26-23. Батарея из 400 элементов, каждый с электродвижущей силой 2 в и внутренним сопротивлением 0,1 ом, должна давать ток на внешнее сопротивление 10 ом. Требуется составить смешанную батарею из такого числа n_1 параллельных групп, содержащих каждая n_2 последовательно соединенных элементов, чтобы получилась максимальная сила тока. Определить числа n_1 и n_2 .

Δ 26-24. Два гальванических элемента с электродвижущими силами E_1 и E_2 и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 соединены параллельно и дают ток I во внешнюю цепь, сопротивление которой равно R .

а) Определить токи в элементах I_1 и I_2 и ток I как функции E_1 , E_2 , r_1 , r_2 и R .

б) Определить внутреннее сопротивление r и электродвижущую силу E элемента, эквивалентного данной батарее. Разобрать случаи: 1) когда $E_1=E_2$ и 2) когда $r_1=r_2$.

в) Определить ток в элементах при коротком замыкании батареи.

г) Найти условия, при которых второй элемент не будет работать.

д) При каком R токи в элементах равны? Всегда ли это возможно?

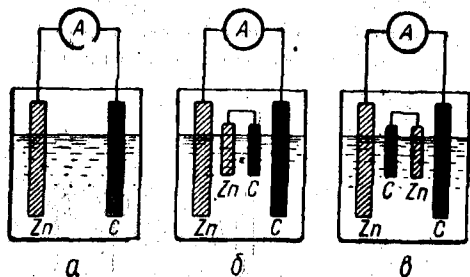


Рис. 26-16.

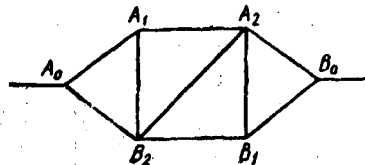


Рис. 26-17.

Δ 26-25. Имеется элемент Грне, в котором поляризацию можно считать устраненной. Элемент дает ток на амперметр, сопротивление которого мало по сравнению с внутренним сопротивлением элемента (рис. 26-16). Как изменится показание амперметра, если в элемент опустить, как показано на рисунках б и в, цинковый и угольный электроды небольшого размера, соединенные проводником малого сопротивления?

Δ 26-26. Определить сопротивление разветвленной цепи, изображенной на рисунке 26-17. Сопротивление каждого стержня равно 1 ом.

§ 27. Мощность и работа тока

1) Работа, производимая электрическими силами на участке цепи, концы которого имеют разность потенциалов U , при токе I в течение времени τ

$$A = \int_0^{\tau} U \cdot I d\tau.$$

Если I и U постоянны, то

$$A = UI\tau.$$

2) Мощность тока

$$P = UI.$$

3) Количество теплоты, выделяющейся на участке цепи с сопротивлением R , по которому идет ток I , за время τ , независимо от наличия или отсутствия э.д.с. на рассматриваемом участке, равно

$$Q = I^2 R \tau.$$

4) Количество теплоты, выделяющееся в 1 см³ проводника с удельным сопротивлением ρ при плотности тока j , равно

$$q = j^2 \rho \tau.$$

\circ 27-1. На рисунках 27-1 и 27-2 показаны два способа включения ваттметра. Показать, что в первом случае показание ваттметра больше измеряемой величины на величину мощности, поглощаемой в толстой обмотке, а во втором — на величину мощности, поглощаемой в тонкой обмотке.

\circ 27-2. Сколько ламп мощностью $P=300$ вт каждая, предназначенных для напряжения $U=110$ в, можно установить в

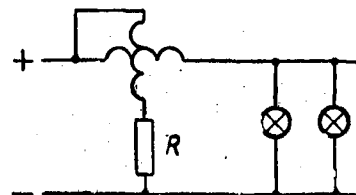


Рис. 27-1.

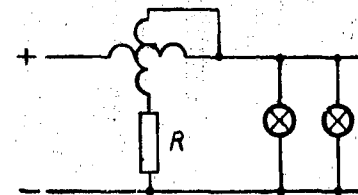


Рис. 27-2.

здании, если проводка от магистрали сделана медным проводом общей длиной $l=100$ м и сечением $S=9$ мм² и если напряжение в магистрали поддерживается равным $U_0=122$ в?

○ 27-3. Определить количество меди m , потребное для устройства проводки с общей длиной $l=5$ км. Напряжение на шинах станции $U_0=240$ в. Передаваемая потребителю мощность $P=60$ кВт. Допускается в проводке потеря напряжения $p=8\%$.

○ 27-4. Как изменится температура медного стержня, если по нему в течение 0,5 сек пройдет ток, плотность которого равна $9 \frac{a}{м.м^2}$. При расчете принять, что передача теплоты окружающим телам отсутствует.

△ 27-5. а) Батарея состоит из $n=5$ последовательно соединенных элементов с э. д. с. $E=1,4$ в каждый и с внутренним сопротивлением по $r=0,3$ ом каждый. При каком токе полезная мощность батареи равна 8 вт?

б) Какова наибольшая полезная мощность батареи?

△ 27-6. Ток от магистрали к потребителю подводится по медной проводке общей длиной 49 м и площадью сечения 2,5 мм². Напряжение в магистрали равно 120 в.

Потребитель намеревается сделать электрическую печь мощностью 600 вт. Каково должно быть сопротивление у печи?

△ 27-7. Определить работу тока на участке, не содержащем источников э. д. с. и имеющем сопротивление $R=12$ ом, если ток в течение $\tau=5$ сек равномерно увеличивался от $I_1=2$ а до $I_2=10$ а.

○ 27-8. Определить работу электрических сил и количество теплоты, выделяемое в течение 1 сек (и то и другое выразить в джоулях) в следующих случаях:

а) в проводе, по которому идет ток 1 а; напряжение между концами провода равно 2 в;

б) в аккумуляторе, который заряжается током в 1 а; напряжение между полюсами аккумулятора равно 2 в; э. д. с. аккумулятора равно 1,3 в;

в) в батарее аккумуляторов, которая дает ток 1 а на внешнее сопротивление; напряжение между полюсами аккумулятора равно 2 в; э. д. с. батареи равно 2,6 в.

△ 27-9. Батарея аккумуляторов, э. д. с. которой $E=12$ в, заряжается при напряжении $U=12,5$ в током $I_1=3$ а. Принимая, что внутреннее сопротивление при заряде и при разряде одинаково и что аккумулятор отдает $\eta_0=70\%$ прошедшего через него при заряде электричества, определить к. п. д. η аккумулятора: а) при разряде током $I_2=3$ а; б) при разряде током $I_2=0,3$ а.

△ 27-10. По проводу, сопротивление которого $R=6$ ом, протекло количество электричества $q=30$ к. Определить количество теплоты, выделенное в проводе в следующих случаях:

а) по проводу в течение $\tau=24$ сек протекал постоянный ток;

б) ток в проводе равномерно убывал до нуля в течение $\tau=24$ сек;

в) ток в проводе убывал до нуля таким образом, что за каждые $\tau=24$ сек он убывал вдвое.

○ 27-11. Сопротивление обмотки электрочайника 16 ом. Определить промежуток времени, за который закипит в нем 600 г воды, имеющей начальную температуру $t_1=10^\circ\text{C}$, если к. п. д. 60% и если напряжение в сети 120 в.

○ 27-12. Сколько витков никелиновой проволоки надо намотать на фарфоровый цилиндр диаметром 1,5 см, чтобы устроить кипятильник, которым в течение 10 мин можно вскипятить 120 г воды при начальной температуре 10°C ; к. п. д. принять 60%. Диаметр проволоки 0,2 мм. Напряжение 100 в.

○ 27-13. Электрический чайник имеет две секции нагревательной проволоки. При включении одной он закипает через 10 мин; при включении другой он закипает через 20 мин. Через сколько времени он закипит, если включить обе секции: а) последовательно? б) параллельно? Напряжение, к. п. д. чайника, количество воды и начальную температуру считать во всех случаях одинаковыми.

□ 27-14. Если напряжение в сети равно $U_1=120$ в, то вода в электрическом чайнике закипает через $\tau_1=20$ мин. Если же напряжение в сети равно $U_2=110$ в, то при таком же количестве воды и при той же начальной температуре вода закипает через $\tau_2=28$ мин. Предполагая для упрощения, что потери теплоты от чайника в окружающее пространство пропорциональны времени нагревания, рассчитать, через сколько времени τ_3 закипит вода в чайнике при напряжении в сети, равном $U_3=100$ в.

△ 27-15. Гальванический элемент с внутренним сопротивлением r замыкают поочередно двумя проволочками с различными сопротивлениями R_1 и R_2 . В каком соотношении должны находиться R_1 , R_2 и r при следующих условиях:

а) в сопротивлениях R_1 и R_2 должно за определенное время выделяться одно и то же количество теплоты;

б) в меньшем сопротивлении должно выделяться больше теплоты?

△ 27-16. Ток идет от медной трубки радиусом $r=2$ мм к медной трубке радиусом $R=4$ см по плоской алюминиевой фольге толщиной $d=0,1$ мм (рис. 27-3). Какое количество тепла выделяется в алюминиевой фольге за $\tau=0,5$ сек, если ток равен $I=5$ а?

□ 27-17. а) К концам свинцовой проволоки длиной $l=5$ см и диаметром $d=0,2$ мм прилагается напряжение $U=100$ в. Ка-

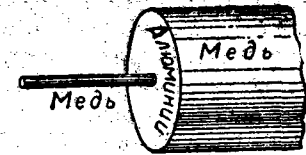


Рис. 27-3.

кой промежуток времени τ пройдет до того момента, как проволока начнет плавиться? Температура плавления свинца $t = 327^\circ \text{C}$. Пренебречь потерей теплоты во внешнее пространство. Принять начальную температуру проволоки равной 0°C . Пренебречь изменением теплоемкости свинца при нагревании.

б) Какой промежуток времени пройдет до начала плавления проволоки, если по ней идет ток $I = 50 \text{ а}$?

□ 27-18. Свинцовая проволока диаметром $d_1 = 1 \text{ мм}$ в плавком предохранителе расплавляется при длительном токе не меньше $I_1 = 8 \text{ а}$. Определить, при каком токе I_2 расплавится проволока диаметром $d_2 = 2 \text{ мм}$. Считать проволоку достаточно длинной (для того чтобы можно было пренебречь охлаждением у ее зажимов). Считать, что потеря теплоты проволокой в окружающее пространство прямо пропорциональна поверхности проволоки.

□ 27-19. Электрическая пустотная лампочка мощностью $P_1 = 50 \text{ вт}$, предназначенная для напряжения $U_1 = 120 \text{ в}$, имеет волосок диаметром поперечного сечения $d_1 = 0,044 \text{ мм}$ и длиной $l = 612 \text{ мм}$. Определить, какой диаметр d_2 и какую длину l_2 должен иметь волосок лампочки мощностью $P_2 = 15 \text{ вт}$, предназначенной для напряжения $U_2 = 220 \text{ в}$. При расчете пренебречь потерями теплоты по крючкам, поддерживающим волосок; считать температуру накала в обоих случаях одинаковой; волосок рассматривать как круглый цилиндр.

□ 27-20. Для накала нити одного из типов электронной лампы требуется напряжение $3,8 \text{ в}$, причем идет ток $0,65 \text{ а}$. Вследствие испарения материала нити диаметр ее уменьшился на 10% . Какое требуется напряжение, чтобы поддержать температуру накала прежней? Какой идет при этом ток?

□ 27-21. Принимая: 1) что охлаждение накаливаемой проволоки в воздухе прямо пропорционально разности температур проволоки и воздуха (закон охлаждения Ньютона); 2) что изменение сопротивления ее с температурой незначительно,

показать, что удлинение проволоки, накаливаемой током, прямо пропорционально квадрату величины тока.

□ 27-22. На рисунке 27-4 изображена схема теплового ваттметра. Тонкая проволока AB , накаливаемая током, перекинута через блок C , оттягиваемый вверх пружинкой (не показанной на рисунке). Показать, что поворот стрелки D прямо пропорционален мощности тока P .

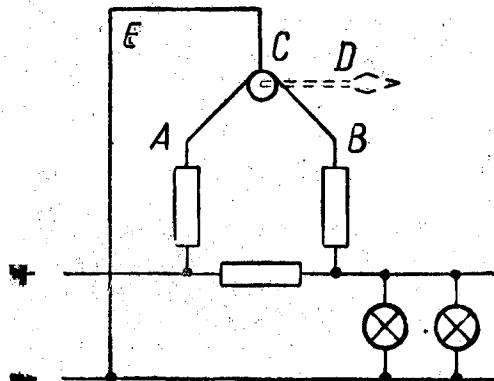


Рис. 27-4.

§ 28. Электронные явления в металлах

1) При решении задач, помещенных в этом параграфе, используется представление, что некоторая часть электронов свободно перемещается внутри металла и что к этой части применимы соотношения кинетической теории газов. Следует помнить, что все результаты, полученные на основании этих представлений, являются лишь первым приближением к действительности.

2) Плотность тока в металле

$$j = nev,$$

где n — концентрация носителей заряда (в случае металла — свободных электронов), e — заряд электрона, v — средняя скорость упорядоченного движения электронов.

3) Между двумя металлами A и B , имеющими общую температуру T и соединенными между собой или непосредственно, или посредством иных металлов, имеется разность потенциалов E_{AB} , зависящая от природы металлов и их общей температуры, но не зависящая от природы и температуры промежуточных металлов (контактная э. д. с.).

4) При прохождении по цепи количества электричества q , помимо джоулевой теплоты, в контактах различных металлов и между сечениями проводов, отличающихся по температуре, выделяется или поглощается количество теплоты, равное Eq , где E — соответствующая э. д. с.

5) Плотность тока эмиссии электронов в вакууме (формула Дешмана)

$$j = AT^2 e^{\frac{\phi_e}{kT}},$$

где A — постоянная; ϕ_e — работа вырывания электрона из металла; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Δ 28-1. Определить количество движения электронов (p), соответствующее току $I = 400 \text{ а}$ в прямом проводе длиной $l = 10 \text{ км}$.

□ 28-2. Принимая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, сделать следующие расчеты относительно медного провода длиной 15 км , сечением 1 мм^2 , по которому идет ток при напряжении 7 в :

а) Определить, сколько времени потребуется для перемещения свободного электрона от одного конца провода до другого.

б) Найти сумму электрических сил, действующих на все свободные электроны в проводе.

Δ 28-3. Предполагая, что свободные электроны внутри вращающегося тела перемещаются от оси вращения к периферии до тех пор, пока центробежная сила инерции не уравнивается электрической силой, определить разность потенциалов между центром и окружностью вращающегося металлического диска. Диаметр диска 5 см , частота оборотов равна 1200 мин^{-1} .

□ 28-4. Катушка содержит 590 витков медного провода

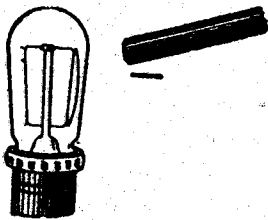


Рис. 28-1.

130 ом. Частота оборотов катушки равна 33 сек⁻¹.

Δ 28-5. Каково наибольшее (теоретически) количество электричества, которое протечет по цепи, состоящей из термопары медь — платина и некоторого сопротивления, при поглощении горячим контактом 1 кал? Температура горячего контакта 100° С; э. д. с. равна 0,76 мв.

О 28-6. Наэлектризованная пылинка может быть уравновешена в электрическом поле; между тем сила тяжести действует на все частицы пылинки, а электрическое поле — лишь на имеющиеся на ней избыточные электроны. Каким образом уравновешиваются эти силы?

Δ 28-7. При приближении отрицательно заряженной палочки к накалиемому волоску электрической лампочки волосок притягивается (рис. 28-1). Если же приблизить положительно заряженную палочку, то волосок остается без движения и притягивается лишь в момент удаления положительного заряда. Если накал лампы очень слабый, то волосок притягивается одинаково и к положительному, и к отрицательному зарядам. Если накал лампы очень силен, то волосок остается в покое при приближении любого заряда.

Объяснить эти явления, принимая во внимание явление термоионной эмиссии, а также то обстоятельство, что в колбе лампы имеется незначительное количество газа.

Δ 28-8. Какова работа выхода из металла, если повышение температуры нити накала, сделанной из этого металла, от 2000 до 2001° К увеличивает ток насыщения в электронной лампе на 1%?

Δ 28-9. Определить ток насыщения в электронной лампе с вольфрамовым катодом при таких данных: длина и диаметр нити накала 3 см и 0,1 мм; температура накала 2700° К; постоянная A для вольфрама равна $60,2 \frac{a}{\text{см}^2 \cdot \text{град}}$.

Δ 28-10. Вольфрамовая нить, служащая катодом в электронной лампе, накаливается током 1,9 а до некоторой температуры. На сколько вольт надо повысить напряжение на этой нити, чтобы при анодном токе 0,1 а температура нити осталась такой же, как и при отсутствии анодного тока?

§ 29. Электрический ток в газах

1) Работа ионизации

$$A = \varphi e,$$

где φ — потенциал ионизации.

2) Связь скоростей ионов v и u с их подвижностями k_+ и k_- и с напряженностью поля

$$v = k_+ E; \quad u = k_- E.$$

3) Плотность тока при концентрации ионов n (насыщение не имеет места)

$$j = en(k_+ + k_-)E.$$

4) Плотность тока насыщения между плоскими электродами, отстоящими на расстоянии d ,

$$j = eqd,$$

где q — число пар ионов, образуемых ионизатором в 1 см³ за 1 сек.

5) Число пар ионов, рекомбинирующих за 1 сек в 1 см³ газа, свободного от пылинок,

$$\Delta n = \alpha n^2,$$

где α — коэффициент рекомбинации. При наличии в газе частиц пыли, дыма и т. п. рекомбинация в значительной мере происходит на них. В таком случае пар ионов, рекомбинирующих за 1 сек, можно считать пропорциональным n :

$$\Delta n = \beta n.$$

6) Средняя продолжительность существования иона

$$\tau = \frac{n}{q}.$$

О 29-1. При какой относительной скорости молекул кислорода может произойти при соударении однократная ионизация одной из них?

Указание. При решении этой и последующих задач следует принять во внимание, что ионизация происходит при неупругом ударе молекул.

Δ 29-2. а) Молекула кислорода ионизируется ударом электрона. Какова разность потенциалов, которую прошел электрон, вызвавший ионизацию, если его начальная скорость мала? Считать также малой скорость ионизируемой молекулы перед ударом.

б) Тот же вопрос относительно иона, масса которого вместе с «прилипшими» молекулами в $n=4$ раза больше массы молекулы кислорода.

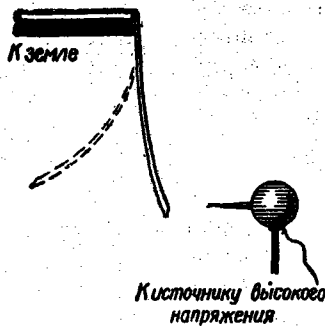


Рис. 29-1.

О 29-3. На рисунке 29-1 изображен опыт по стеканию зарядов с острия. Против заряженного острия находится узкая полоска папиросной бумаги, верхний конец которой прикреплен к штативу, отведенному к земле. При медленном повышении напряжения между острием и землей полоска сначала притягивается к острию, затем при некотором определенном для данного острия напряжении резко отталкивается. Объяснить явления.

Δ 29-4. Предположим, что два иона движутся в газе вокруг их общего центра инерции, причем общая кинетическая энергия их движения равна средней энергии поступательного движения молекул окружающего газа. Чему равно расстояние b между ними при 0°C ?

О 29-5. Воздух, заключенный между двумя пластинами с площадью 300 см^2 , находящимися на расстоянии 2 см друг от друга, ионизируется рентгеновскими лучами. При напряжении 150 в , значительно меньшем, чем напряжение, дающее ток насыщения, между пластинами идет ток $4 \cdot 10^{-6}\text{ а}$. Определить концентрацию ионов между пластинами.

О 29-6. Концентрация ионов, обуславливающих проводимость атмосферного воздуха, в среднем равна 700 см^{-3} . Средняя величина напряженности земного электрического поля равна $130\frac{\text{в}}{\text{м}}$. Вычислить плотность тока проводимости в атмосфере.

О 29-7. Воздух между двумя пластинками конденсатора ионизируется. Ток насыщения между ними равен $2 \cdot 10^{-10}\text{ а}$. Площадь пластинок 100 см^2 , расстояние между ними $0,5\text{ см}$. Определить число пар ионов, образующихся за 1 сек в 1 см^3 .

Δ 29-8. Можно считать, что столкнувшиеся ионы рекомбинируются. Во сколько раз увеличивается число столкновений ионов воздуха вследствие их взаимодействия по сравнению с незаряженными молекулами при температуре 17°C ? Диаметр молекул воздуха принять равным $\sigma = 3 \cdot 10^{-8}\text{ см}$. Коэффициент рекомбинации $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6}\text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$.

Δ 29-9. Число пар ионов, образующихся в 1 см^3 воздуха за 1 сек , принимают равным над океанами вдали от суши около 1 (действие космического излучения), над сушей в среднем около 8 (действие космических лучей и радиоактивных веществ в воздухе и в почве). Воздух над океаном можно считать свободным от пыли; $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6}\text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$. Воздух над сушей загрязнен пылью; $\beta = 0,01\text{ сек}^{-1}$.

а) Вычислить концентрацию ионов над океаном и над сушей.

б) На сколько переместятся в вертикальном направлении положительные и отрицательные ионы в воздухе над океаном и над сушей, если напряженность электрического поля Земли в обоих случаях равна $130\frac{\text{в}}{\text{м}}$?

Δ 29-10. Число пар ионов в 1 см^3 воздуха при ионизации рентгеновскими лучами равно $n_0 = 10^6\text{ см}^{-3}$. Через сколько времени от момента прекращения действия ионизатора число пар ионов уменьшится до $n = 10^4\text{ см}^{-3}$:

а) если воздух чистый ($\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6}\text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$)?

б) если воздух загрязнен пылью ($\beta = 10^{-2}\text{ сек}^{-1}$)?

Наличием других ионизаторов пренебречь.

□ 29-11. Газ между двумя плоскими электродами ионизируется. Вблизи электродов рекомбинации не происходит, так как все образующиеся там ионы достигают электродов раньше, чем успеют рекомбинироваться. Исходя из этого:

а) показать, что формула $j = en(k_+ + k_-) \frac{U}{d}$ переходит в формулу

для плотности тока насыщения $j = eqd$, как только будет достигнута такая скорость ионов, что рекомбинация не будет иметь места нигде в пространстве между электродами;

б) вычислить, при каком напряжении должен получиться ток насыщения, если расстояние между электродами $d = 3\text{ см}$ и если $q = 10^7\text{ сек}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$. Воздух свободен от пыли ($\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6}\text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$).

Δ 29-12. В изогнутой трубке с высоким вакуумом (рис. 29-2) электроны летят от катода к аноду по траекториям, изогнутым по форме трубки. Как это объяснить?

О 29-13. На рисунке 29-3 представлено распределение потенциала в трубке, в которой происходит тлеющий разряд (схематически). В какой области между электродами напряженность поля наиболее велика? Где она равна нулю? Указать области, где имеются пространственные заряды.

Δ 29-14. По пустотной трубке идет ток, и поток электронов ударяет в анод, передавая ему некоторое количество движения. Значит ли это, что результирующая сила, действующая на анод, отлична от нуля?

Δ 29-15. При движении электронов в вакуумной трубке они не встречают на своем пути атомов и молекул, следовательно, нельзя говорить о тепловом действии тока внутри трубки. Почему же не равно нулю напряжение между электродами трубки?

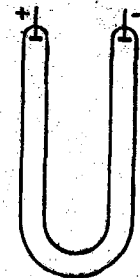


Рис. 29-2.

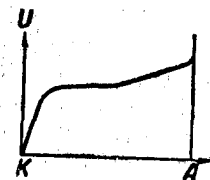


Рис. 29-3.

§ 30. Явления в электролитах

1) Закон Фарадея для массы m вещества, выделенного на электроде при прохождении количества электричества q ,

$$m = \frac{A}{z} \cdot \frac{q}{F},$$

где A — атомный (или молекулярный) вес вещества; z — валентность; F — число Фарадея.

2) Удельная проводимость электролита

$$g = ze n \alpha (k_+ + k_-),$$

где ze — заряд иона; n — концентрация молекул растворенного вещества; α — коэффициент диссоциации; k_+ и k_- — подвижности ионов.

3) Уравнение Гиббса — Гельмгольца (§ 18) в применении к разности потенциалов между электродом и электролитом (полужелемент) или между двумя электродами, опущенными в электролит (элемент),

$$E = \frac{H}{Fz} + T \frac{dE}{dT},$$

где H — общая сумма количества теплоты, выделяющейся при реакции внутри элемента (или полужелемента) на 1 моль ионов.

○ 30-1. Двигаются ли ионы в электролитах по силовым линиям электрического поля? Что имеют в виду, когда говорят, что линии тока в электролитах совпадают с силовыми линиями поля?

○ 30-2. Никелирование металлического изделия с площадью 120 см² продолжалось 5 ч током 0,3 а. Валентность никеля равна 2. Определить толщину слоя никеля.

○ 30-3. Сколько цинка расходуется в элементе Даниеля за 20 мин работы при токе 0,5 а? Валентность цинка равна 2. Принять, что выход тока равен 100%.

○ 30-4. Какое количество воды разложится при электролизе раствора серной кислоты в течение $t = 10$ мин, если ток равен $I = 0,8$ а?

○ 30-5. Определить коэффициент диссоциации водного раствора хлористого калия (KCl) с концентрацией $c = 0,1 \frac{г}{см^3}$. Удельное сопротивление такого раствора при 18° С равно 7,36 ом·см.

○ 30-6. Коэффициент диссоциации водного раствора, содержащего 0,064 г азотной кислоты в 1 см³, равен 0,824. Какова удельная электропроводность этого раствора при 18° С?

△ 30-7. Определить диаметр шарика, который, имея тот же заряд, что и ион серебра, движется в слабом водном растворе соли серебра при наличии электрического поля с той же ско-

ростью, что и ион серебра. Принять, что сопротивление среды при движении шарика определяется формулой Стокса (см. § 9) и что вязкость раствора такая же, как вязкость воды при 18° С.

△ 30-8. В воде растворено 1,5 г кристаллов медного купороса (CuSO₄·5H₂O), причем получившийся раствор имеет объем 100 см³. В раствор опущены два медных электрода в виде прямоугольных пластин со сторонами 8 и 10 см. Напряжение между электродами равно 0,5 в, ток равен 0,56 а.

а) Какова общая сумма электрических сил, действующих на ионы Cu²⁺, находящиеся между электродами?

б) Какова арифметическая сумма скоростей упорядоченного движения ионов Cu²⁺ и SO₄²⁻? При расчете принять, что диссоциация растворенного вещества является полной.

○ 30-9. Определить молярную теплоту перехода в раствор ионов таллия. Разность потенциалов между таллием и раствором, содержащим моль ионов таллия (Tl⁺) в 1 л при температуре 25° С, равна $E = -0,0576$ в, а изменение этой разности потенциалов при изменении температуры равно $-0,00121 \frac{в}{град}$.

§ 31. Магнетизм

1) Магнитный момент прямой катушки, где w — число витков, S — их площадь, I — ток:

$$p = wIS = w_1 IS_1,$$

где $w_1 = \frac{w}{l}$ — густота витков.

Эта формула при $w = 1$ применима к 1 витку. При наличии в катушке сердечника к этой величине добавляется магнитный момент сердечника

$$p_1 = MV,$$

где M — намагниченность; V — объем сердечника.

2) Магнитный момент тонкого прямого магнита

$$p_1 = MV.$$

(В общем случае это интеграл по объему от вектора намагниченности.)

3) Магнитный момент нескольких катушек или магнитов равен векторной сумме их магнитных моментов.

4) Вращающий момент, действующий на катушку (или на магнит) с магнитным моментом p , находящуюся в магнитном поле, индукция которого B составляет угол α с их осью:

$$K = Bp \sin \alpha.$$

Примечание. Часто (в том числе и в предыдущих изданиях этой книги) вместо B в этой формуле пишут H , а в первую формулу для величины p вводят множитель μ_0 .

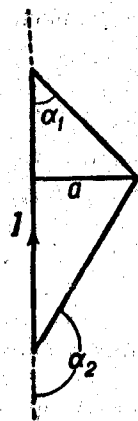


Рис. 31-1.

5) Напряженность поля, создаваемого элементом Δl провода, по которому идет ток I , в точке, находящейся на расстоянии r ,

$$\Delta H = \frac{\Delta I \sin(I, r)}{4\pi r^2} \quad \left[\Delta H = \frac{\Delta I \sin(I, r)}{cr^2} \right].$$

6) Напряженность поля, создаваемого током I в конечном отрезке l прямого провода, в точке, отстоящей на расстоянии a от отрезка (рис. 31-1):

$$H = \frac{1}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad \left[H = \frac{1}{ca} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \right].$$

В случае очень длинного отрезка прямого провода для точек, близких к его середине, выражение в скобках мало отличается от 2. В этом случае можно принять

$$H = \frac{1}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad \left[H = \frac{1}{ca} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \right].$$

7) Напряженность магнитного поля в центре дуги окружности длиной L

$$H = \frac{IL}{4\pi R^2} \quad \left(H = \frac{IL}{cR^2} \right),$$

где R — радиус окружности. Если дуга охватывает полную окружность, то

$$H = \frac{I}{2R} \quad \left(H = \frac{2\pi I}{cR} \right).$$

8) Напряженность поля внутри длинной прямой катушки (соленоида) в точках, близких к ее середине,

$$H = \frac{wl}{l} \quad \left(H = \frac{4\pi}{c} \frac{wl}{l} \right).$$

9) Напряженность поля внутри тороида (кольцевого соленоида) на расстоянии R от его оси (рис. 31-2)

$$H = \frac{wl}{2\pi R} \quad \left(H = \frac{2Iw}{cR} \right).$$

10) Циркуляция напряженности поля при обходе вокруг токов I_1, I_2, \dots и т. д.

$$\oint H dS = I_1 + I_2 + \dots + \left[\oint H dS = \frac{4\pi}{c} (I_1 + I_2 + \dots) \right].$$

11) Связь между магнитной индукцией B , проницаемостью μ' или μ и напряженностью магнитного поля дается формулой $B = \mu H$ или функциональной зависимостью, заданной в ви-

де графика $B = f(H)$ (в случае ферромагнетиков; в последнем случае часто существен гистерезис, и зависимость $B(H)$ носит неоднозначный характер).

Всегда

$$B = \mu_0' (H + M) \quad (B = H + 4\pi M),$$

где M — намагниченность (объемная плотность дипольного момента $\frac{\Delta p}{\Delta V}$); H всегда удовлетворяет формуле 10), а B не имеет источников.

В диа- и парамагнетиках

$$M = \kappa' H \quad (M = \kappa H),$$

где $\kappa' = 4\pi\kappa$ есть магнитная восприимчивость, пропорциональная плотности вещества.

12) Сила, действующая на прямолинейный отрезок Δl провода, по которому идет ток I , в магнитном поле

$$F = B \Delta l I \sin(B, \Delta l) \quad [F = B \Delta l \frac{I}{c} \sin(B, \Delta l)],$$

13) Сила, действующая на заряд q , движущийся со скоростью v в магнитном поле,

$$F = B q v \sin(B, v) \quad [F = B \Delta l q \frac{v}{c} \sin(B, v)].$$

14) Сила, действующая в неоднородном магнитном поле на короткий соленоид (или магнит), ось которого расположена вдоль поля,

$$F = -p \frac{\Delta B}{\Delta l}.$$

15) Сила, действующая на отрезок l одного из двух длинных параллельных проводов, находящихся на расстоянии b , по которым текут токи I_1 и I_2 ,

$$F = \frac{I_1 I_2 l \mu'}{2\pi b} \quad \left(F = \frac{2 I_1 I_2 l \mu}{c^2 b} \right).$$

16) Магнитный поток, пронизывающий плоскую поверхность,

$$\Phi = BS \cos(B, S).$$

17) Магнитный поток в сердечнике с различными магнитными проницаемостями и различными сечениями на разных участках магнитной цепи

$$\Phi = \frac{wl}{\sum \frac{l}{\mu S}} \quad \left(\Phi = \frac{4\pi wl}{c \sum \frac{l}{\mu S}} \right).$$

18) В случае, если длина катушки значительно больше ее диаметра

$$\Phi = \frac{wl \mu' S}{l} = \frac{\mu_0' p}{l} \quad \left(\Phi = \frac{4\pi w l \mu S}{cl} \right).$$

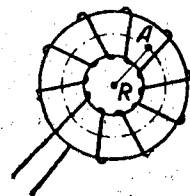


Рис. 31-2.

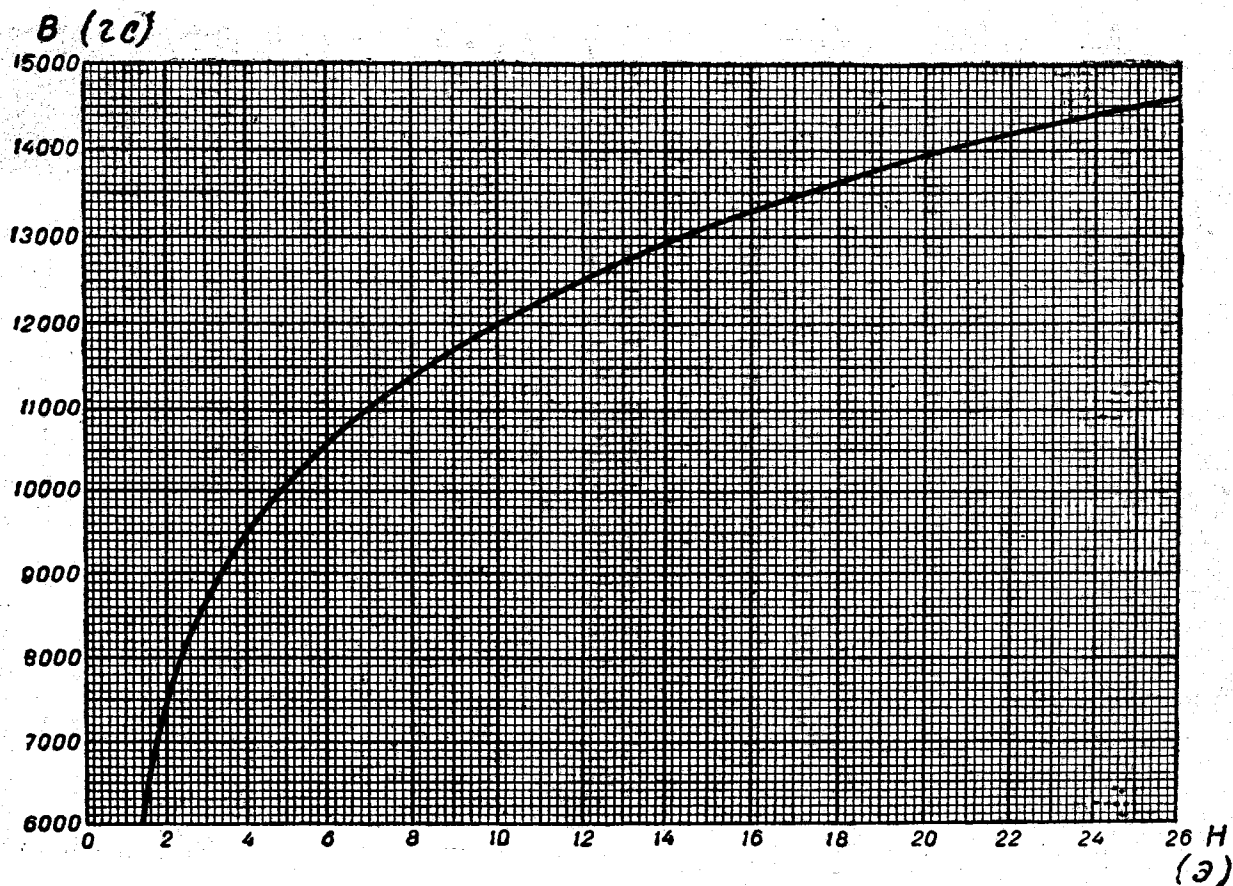


Рис. 31-3.

19) Подъемная сила магнита (S — сечение магнита)

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0'} \quad \left(F = \frac{B^2 S}{8\pi} \right),$$

где μ_0' — магнитная проницаемость среды, в которой действует магнит (воздух).

20) Во всех задачах, где речь идет о железных сердечниках, предполагается, что магнитные свойства железа выражены графиком, изображенным на рисунке 31-3.

21) Для облегчения перевода числовых значений величин из одной системы единиц в другую служит таблица 11-4 (см. также статью «Вниманию студентов» в начале книги, пункт 7).

○ 31-1. Ось прямой катушки, имеющей 400 витков по 4 см диаметром, расположена горизонтально в плоскости магнитного меридиана. По катушке идет ток 6 а. Определить действующий на нее вращающий момент, если напряженность земного магнитного поля равна $40 \frac{a}{м}$, а наклонение равно 70° .

○ 31-2. На рисунках 31-4, а, б, в, г соленоиды различной формы, у которых общее число витков, их площадь, длина, а также величина тока одинаковы и равны: $w = 3000$; $S = 10 \text{ см}^2$; $I = 2a$. Определить магнитные моменты соленоидов, пренебрегая магнитными потоками, перпендикулярными к плоскости чертежа.

△ 31-3. На рисунке 31-5 изображена двойная спираль, служащая в некоторых типах ламп накаливаемым телом. Общее число больших витков w_1 , малых w_2 . Площадь больших витков S_1 , малых S_2 . По спирали идет ток I . Определить магнитный момент двойной спирали.

△ 31-4. Период небольших колебаний маленькой магнитной стрелки около вертикальной оси в земном магнитном поле равен 0,7 сек. Период колебаний той же стрелки, помещенной внутри соленоида, по которому идет ток, равен 0,1 сек. Затухание колебаний в обоих случаях невелико. Горизонтальная составляющая земного поля в системе СИ равна $14,3 \frac{a}{м}$. Определить напряженность поля внутри соленоида.

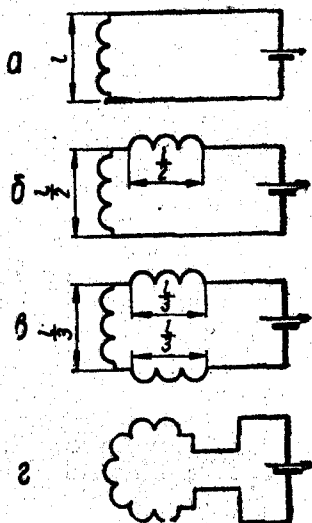


Рис. 31-4.



Рис. 31-5.

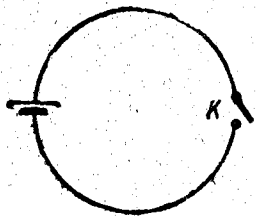


Рис. 31-6.

○ 31-5. Намагниченная спица подвешена на нити в горизонтальном положении и колеблется под действием земного магнитного поля. Крутильный момент нити ничтожно мал. Как изменится период колебания, если спицу разломать пополам и подвесить половинку?

△ 31-6. а) До замыкания ключа K в цепи (рис. 31-6) момент количества движения электронов в проводниках, составляющих цепь, равен нулю. После замыкания ключа K по цепи идет ток и момент количества движения электронов отличен от нуля. Нарушается ли этим закон сохранения момента количества движения?

б) Каков момент количества движения у электронов в этой цепи, если магнитный момент равен $p = 5 \text{ а} \cdot \text{м}^2$?

○ 31-7. Железные опилки, насыпанные на горизонтально расположенный картон, сквозь который проходит вертикально протянутый провод, несущий ток, при простукивании по картону стягиваются по направлению к проводу; при этом они движутся в направлении, перпендикулярном к силовым линиям магнитного поля тока. Почему это происходит?

△ 31-8. По трем длинным прямым проводам, расположенным в одной плоскости параллельно друг другу на расстоянии 3 см , текут токи $I_1 = I_2$ и $I_3 = -(I_1 + I_2)$. Определить положение прямой, в которой напряженность поля, создаваемого токами, равна нулю.

○ 31-9. По длинному вертикальному проводу сверху вниз течет ток 4 а . Указать точку вблизи середины провода, в которой поле, получающееся от сложения земного поля и поля тока, имеет вертикальное направление. Горизонтальную составляющую земного магнитного поля принять равной $16 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

○ 31-10. По длинному проводу, протянутому перпендикулярно к плоскости магнитного меридиана в направлении на запад, идет ток 15 а . Напряженность земного магнитного поля в данном месте равна $0,5 \text{ э}$, а угол наклоения 70° .

а) Указать точку вблизи середины провода, в которой напряженность результирующего поля равна нулю.

б) Какова напряженность результирующего поля на 5 см выше и ниже провода?

△ 31-11. По двум длинным проводам, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 5 см , идут в одном направлении токи 5 и 10 а . Определить напряженность поля в точке, отстоящей на 2 см от первого из проводов и на 5 см от второго.

△ 31-12. По длинному проводу, согнутому под прямым углом, идет ток 20 а . Определить напряженность магнитного

поля в точке, лежащей на продолжении одной из сторон угла на расстоянии 2 см от вершины.

△ 31-13. Ток $I = 30 \text{ а}$ идет по длинному проводу, согнутому под углом $\alpha = 56^\circ$ (рис. 31-7). Определить напряженность поля в точке A , находящейся на биссектрисе угла на расстоянии $a = 5 \text{ см}$ от вершины угла.

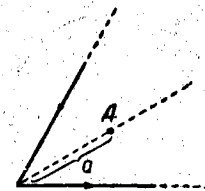


Рис. 31-7.

△ 31-14. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током $I = 6 \text{ а}$, текущим по проводу, согнутому в виде прямоугольника со сторонами $a = 16 \text{ см}$ и $b = 30 \text{ см}$, в его центре.

△ 31-15. Определить напряженность поля, создаваемого током $I = 5 \text{ а}$, текущим по проводу, согнутому в виде правильного треугольника со стороной $a = 30 \text{ см}$, в вершине правильного тетраэдра, для которого этот треугольник служит основанием.

△ 31-16. По проводу, согнутому в виде кольца радиусом $R = 11 \text{ см}$, течет ток $I = 14 \text{ а}$. Найти напряженность поля: а) в центре кольца; б) в точке, лежащей на перпендикуляре к плоскости кольца, восставленном из его центра, на расстоянии $a = 10 \text{ см}$ от центра.

○ 31-17. К двум точкам проволочного кольца подведены идущие радиально провода, соединенные с весьма удаленным источником тока (рис. 31-8). Чему равна напряженность поля в центре кольца?

△ 31-18. По длинному прямому соленоиду, имеющему 35 витков на 1 см длины, течет ток 2 а . Определить напряженность поля: а) внутри соленоида близ его середины; б) в центре одного из его оснований.

△ 31-19. Диаметр витков соленоида в $n = 4$ раза больше длины его оси. Густота витков равна $w_1 = 200 \text{ см}^{-1}$. По виткам соленоида идет ток $I = 0,1 \text{ а}$. Определить напряженность магнитного поля: а) в середине оси соленоида; б) в центре одного из его оснований.

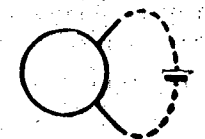


Рис. 31-8.

○ 31-20. Определить напряженность поля, создаваемого в воздухе соленоидом с магнитным моментом $p = 60 \text{ ед. СГС}$ в точке на оси соленоида, отстоящей от соленоида на расстоянии $a = 50 \text{ см}$, которое является значительным по сравнению с диаметром соленоида и его длиной.

△ 31-21. Кольцевой соленоид с деревянным сердечником в виде кольца с прямоугольным сечением, размеры которого показаны на рисунке 31-9, имеет $w = 500$

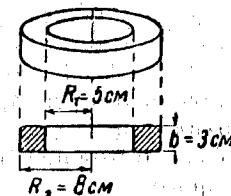


Рис. 31-9.

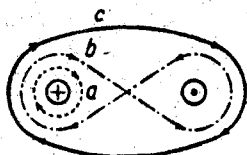


Рис. 31-10.

○ 31-23. Определить циркуляцию напряженности в случаях, изображенных на рисунке 31-10, если в обоих проводах идут токи 8 а.

△ 31-24. Ток идет по полой металлической трубе. Показать, что: а) напряженность поля внутри трубы равна нулю; б) напряженность поля вне трубы такая же, как напряженность поля, созданного током, текущим по тонкому проводу, совпадающему с осью трубы.

□ 31-25. Какова структура магнитного поля: а) в случае, описанном в задаче 27-16; б) в случае, описанном в задаче 25-6.

△ 31-26. Ток $I=20$ а идет по полой тонкостенной трубе радиусом $R_2=5$ см и обратно по сплошному проводнику радиусом $R_1=1$ мм, проложенному по оси трубы. Длина трубы $l=20$ м. Чему равен магнитный поток такой системы? Магнитным полем внутри металла пренебречь.

△ 31-27. По медному проводу, сечение которого является кругом ($R=2$ см), течет ток $I=500$ а.

а) Определить напряженность магнитного поля внутри провода в точке, отстоящей на расстоянии $r=0,5$ см от оси провода.

б) Определить магнитный поток внутри провода, если длина его равна 3 м. (Имеется в виду поток, пронизывающий одну из половин осевого сечения провода.)

□ 31-28. Внутри длинного круглого металлического цилиндра, вдоль которого идет ток плотностью j , имеется цилиндрическая полость, ось которой отстоит от оси цилиндра на расстоянии d (рис. 31-11). Определить напряженность магнитного поля внутри полости.

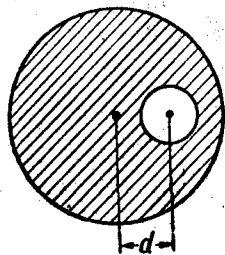


Рис. 31-11.

витков. Определить магнитный поток при токе $I=2,5$ а в обмотке.

○ 31-22. Циркуляция напряженности по замкнутым кривым на поверхности Земли (например, по широтным кругам) отлична от нуля. Какой вывод следует сделать из этого наблюдения для области, в которой циркуляция по ее контуру по стрелке часов положительна?

△ 31-30. Медный провод сечением $S=2$ мм², согнутый в виде трех сторон квадрата, может вращаться, как показано на рисунке 31-12, около горизонтальной оси. Провод находится в однородном магнитном поле, направленном вертикально. Когда по проводу идет ток $I=10$ а, провод отклоняется от положения равновесия на угол $\alpha=15^\circ$. Определить индукцию поля.

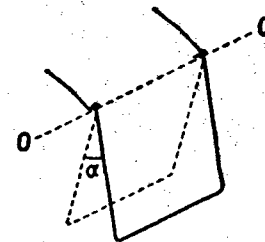


Рис. 31-12.

△ 31-31. По кольцу диаметром $d=10$ см из свинцовой проволоки площадью сечения $S=0,7$ мм² идет ток $I=7$ а, отчего температура проволоки повышается до температуры, близкой к плавлению. Прочность свинца на разрыв при этой температуре равна $p_0=2 \frac{\text{н}}{\text{мм}^2}$. Разорвется ли такое кольцо, если поместить его в магнитное поле, индукция которого

$B=1 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$ (плоскость кольца перпендикулярна к полю)?

○ 31-32. Шины электростанции представляют собой параллельные медные полосы длиной 3 м, находящиеся на расстоянии 50 см. При коротком замыкании по ним может пойти ток 10 000 а.

С какой силой взаимодействуют при этом шины?

□ 31-33. По двум круглым проводам, оси которых параллельны, а радиусы сечений сравнимы с расстоянием между осями, текут токи, плотности которых по всему сечению неизменны. Показать, что сила взаимодействия таких проводов выражается по формуле пункта 15) введения, причем b означает расстояние между осями проводов.

□ 31-34. В приложении к Государственному стандарту 8033—56 дано определение единицы тока — ампера: «Ампер есть сила неизменяющегося тока, который, будучи поддерживаем в двух параллельных прямолинейных проводниках бесконечной длины и

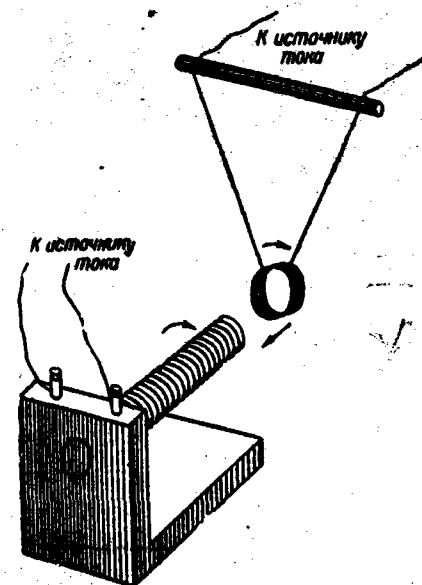


Рис. 31-13.

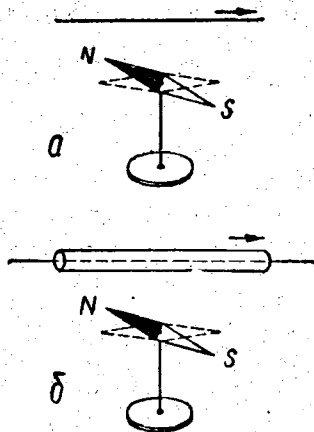


Рис. 31-14.

Δ 31-36. На рисунке 31-13 изображен демонстрационный опыт по взаимодействию токов. Если по катушкам текут попутные токи и направления магнитных полей внутри катушек совпадают, то катушка большего диаметра надевается на катушку, имеющую меньший диаметр. Для опыта берутся катушки, диаметры которых разнятся лишь немного, а катушка с меньшим диаметром значительно длиннее другой.

Как будет проходить опыт, если диаметр подвижной катушки в несколько раз больше диаметра неподвижной катушки?

○ 31-37. На рисунке 31-14, а изображен известный из курса школьной физики опыт Эрстеда. Как изменится угол, на который отклоняется при включении тока магнитная стрелка, если, не меняя величины тока и расстояния провода от стрелки, сделать следующие изменения опыта: а) взять стрелку такого же размера, но намагниченную более сильно?

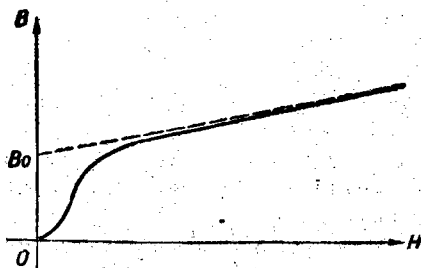


Рис. 31-15.

ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 метра один от другого в пустоте, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы системы СИ на 1 метр длины».

Зачем в стандарт внесено указание, что проводники должны быть «бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения»?

Δ 31-35. Две катушки, магнитные моменты которых равны $p_1=80$ СГС и $p_2=120$ СГС, расположены так, что их оси находятся на одной прямой. Расстояние между ними $R=100$ см велико по сравнению с диаметром и длиной катушки. Определить силу их взаимодействия.

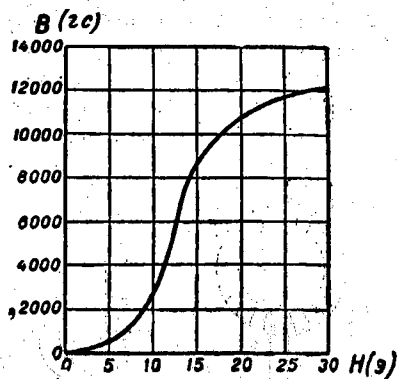


Рис. 31-16.

б) взять стрелку более длинную? в) окружить провод железной трубой (рис. 31-14, б)? Пренебречь взаимодействием стрелки с индуцированным в трубе продольным намагничиванием.

○ 31-38. Кривая намагничивания железа асимптотически приближается к прямой (рис. 31-15). Что означает величина OB_0 ?

○ 31-39. Как определить по графику (рис. 31-16) значения B и H , соответствующие максимуму μ ?

○ 31-40. Определить коэрцитивную напряженность в материале постоянного магнита длиной 15 см, если поле вне магнита исчезает при наличии тока 2 а в обмотке в 300 витков, навитой на магнит.

Δ 31-41. На железном кольце (тороиде) имеется обмотка, содержащая 1000 витков. По обмотке идет ток 1 а. Определить напряженность и индукцию магнитного поля внутри тороида на расстоянии: а) 10 см от центра тороида; б) 12,5 см.

Δ 31-42. Средний диаметр железного кольца равен 15 см. Площадь сечения кольца 7 см². На кольцо навито 500 витков провода. Принимая, что поле внутри кольца, имеющее место при наличии тока в обмотке, является однородным, определить:

- а) магнитный поток в сердечнике при токе 0,6 а;
- б) при каком токе магнитный поток в кольце равен $8,4 \cdot 10^{-4}$ вб.

Δ 31-43. Средняя длина окружности железного кольца $l=61$ см. В нем сделан прорез $l_1=1$ см (рис. 31-17). На кольцо имеется обмотка с $\omega=1000$ витками. Когда по обмотке идет ток $I=1,5$ а, индукция поля в прорезе равна $B=1800$ Гс. Определить μ железа при этих условиях, приняв, что площадь сечения магнитного потока в прорезе в $k=1,1$ раза больше площади сечения кольца.

Δ 31-44. Два одинаковых железных кольца ($d=10$ см) имеют обмотки по $\omega=100$ витков каждая. В одном из колец имеется поперечный прорез $d_1=1$ мм. По обмотке сплошного кольца идет ток $I_1=2$ а. Какой ток I_2 надо пустить по обмотке второго кольца, чтобы создать в нем ту же индукцию? Считать площади сечения потока индукции в воздухе и в железе одинаковыми.

Δ 31-45. Общая длина силовых линий в электромагните равна 36 см, а толщина каждого из воздушных зазоров 0,2 мм (рис. 31-18). Площадь сечения магнитного потока всюду равна 2 см². Обмотка электромагнита имеет 294 витка. При токе 3 а подъемная сила магнита равна 160 н. Определить, каковы при этих условиях: а) индукция; б) магнитная проницаемость железа.

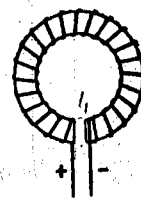


Рис. 31-17.

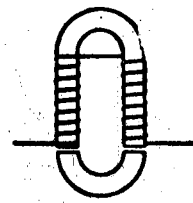


Рис. 31-18.

○ 31-46. Какой из электромагнитов, изображенных на рисунке 31-19, имеет большую

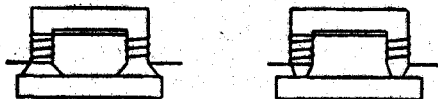


Рис. 31-19.

ца, у концов которой удерживаются приложенные к ним небольшие одинаковые гвозди. Если один из концов спицы накалил добела (примерно до середины) и затем охладить, то подвергшийся нагреванию конец не удерживает гвоздика, в то время как другой конец удерживает.

○ 31-48. Траектория пучка электронов, движущихся в вакууме в магнитном поле ($B=70$ гс), — дуга окружности радиусом 3 см. Определить скорость и энергию электронов.

△ 31-49. Электрон движется в магнитном поле, индукция которого $B=20$ гс, по винтовой линии радиусом $R=2$ см и шагом $h=5$ см (рис. 31-20). Определить скорость электрона.

△ 31-50. Однородное электрическое ($E=3 \frac{\text{э}}{\text{см}}$) и магнитное ($B=1$ гс) поля направлены взаимно перпендикулярно. Каковы должны быть направление и величина скорости электрона, чтобы его траектория была прямолинейна?

△ 31-51. Каковы нормальное и тангенциальное ускорения электрона, движущегося в совпадающих по направлению электрическом и магнитном полях? а) Скорость электрона v направлена вдоль полей. б) Скорость электрона направлена перпендикулярно к ним.

□ 31-52. Одним из типов приборов, служащих для получения быстро движущихся заряженных частиц, является циклотрон, представляющий собой низкую цилиндрическую металлическую коробку (рис. 31-21), разрезанную на две половины (дуанты). Дуанты помещены в вакуум. Между ними создается электрическое поле, причем через некоторые промежутки времени направление этого поля меняется. Вблизи центра одного из дуантов имеется источник ионов K . Дуанты находятся

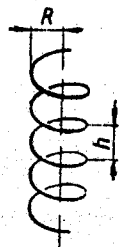


Рис. 31-20.

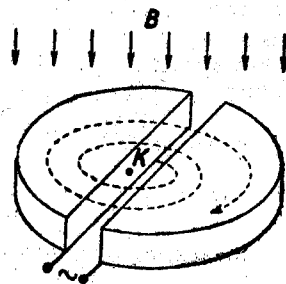


Рис. 31-21.

подъемную силу, если используемый магнитный поток в обоих случаях одинаков?

○ 31-47. Объяснить следующий опыт. Имеется намагниченная стальная спица,

в однородном магнитном поле, направление которого показано на рисунке стрелками.

Ион, попавший в разрез между дуантами, вследствие действия электрического поля движется с ускорением. Затем внутри дуанта он движется под действием магнитного поля по дуге окружности и вновь подлетает к разрезу между дуантами. Промежуток времени, по истечении которого напряжение между дуантами меняет свой знак, подбирается так, чтобы ион успел описать внутри дуанта полуокружность. Таким образом, при каждом переходе иона из одного дуанта в другой скорость его увеличивается, и ион описывает внутри дуантов полуокружности все большего диаметра.

а) Доказать, что промежутки времени, через которые надо менять направление электрического поля между дуантами, не зависят от радиуса полуокружности, по которой движется ион, а потому должны оставаться неизменными во все время движения иона.

б) Определить индукцию магнитного поля, которая требуется для сообщения протону энергии $\mathcal{E}=4$ Мэв, если максимальный радиус полуокружности внутри дуанта равен $R=60$ см.

в) Определить промежуток времени, в течение которого протон достигает указанной энергии. Его начальная скорость мала. В моменты перехода протона из одного дуанта в другой напряжение между ними равно $U=20\,000$ в. Промежуток между дуантами $d=1$ см. Принять, что поле между дуантами однородно.

△ 31-53. Какая сила действует на витки длинной круглой катушки, если они намотаны под углом 45° к образующей цилиндра?

§ 32. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле и электромагнитная индукция

1) Работа при перемещении проводника, по которому идет ток I ,

$$\Delta A = I \Delta \Phi \quad (\Delta A = \frac{I}{c} \Delta \Phi),$$

где $\Delta \Phi$ — изменение магнитного потока в контуре, по которому идет ток.

2) Мощность при перемещении со скоростью v в магнитном поле проводника длиной Δl , по которому идет ток I ,

$$P = B I \Delta l v \sin(B, v) \quad [P = B I \Delta l \frac{v}{c} \sin(B, v)].$$

Направления Δl и v предполагаются взаимно перпендикулярными.

3) Э. д. с. индукции в контуре, пронизываемом потоком Φ ,

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (E = - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}).$$

4) Э. д. с. индукции в проводнике длиной Δl , движущемся в магнитном поле со скоростью v ,

$$E = B \Delta l v \sin(B, v) \quad [E = B \Delta l \frac{v}{c} \sin(B, v)].$$

Направления v и Δl предполагаются взаимно перпендикулярными.

5) Количество индуцируемого электричества в контуре с сопротивлением R при изменении пронизывающего его потока на $\Delta \Phi$:

$$q = -\frac{\Delta \Phi}{R} \quad (E = -\frac{1}{c} \frac{\Delta \Phi}{R}).$$

6) Индуктивность соленоида с числом витков w

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (L = \frac{\Phi}{Ic}).$$

Здесь $\Phi = \Phi_1 w$, где Φ_1 — поток, пересекающий 1 виток.

7) Индуктивность прямого соленоида равна

$$L = k \frac{w^2 \mu' S}{l} \quad (L = k \frac{4\pi w^2 S}{c^2}),$$

где l — длина соленоида; S — площадь, ограничиваемая каждым витком соленоида (приблизительно ее можно считать равной площади сечения сердечника соленоида); w — число витков; μ и μ' — магнитная проницаемость среды (приблизительно под μ можно подразумевать магнитную проницаемость сердечника, находящегося внутри соленоида), выраженная соответственно в системе СГС и в системе СИ; k — безразмерный множитель, значение которого зависит от отношения диаметра соленоида к его длине (см. задачу 32-24). При $l \gg d$ можно принимать k равным единице. В случае кольцевого соленоида, диаметр которого значительно больше диаметра витков, можно применять для расчета индуктивности ту же формулу, подразумевая под l среднюю длину магнитных силовых линий внутри соленоида.

8) Если в цепь включены две катушки, индуктивности которых равны L_1 и L_2 , взаимная индуктивность равна M , то общая индуктивность системы равна

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M.$$

Знак $+$ ставится в том случае, если магнитные поля в катушках усиливают друг друга.

9) Ток в цепи, содержащей постоянную э. д. с., омическое сопротивление R и индуктивность L , через время t после замыкания

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right).$$

10) Ток в цепи через время t после исчезновения в ней э. д. с.

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t},$$

где I_0 — ток в момент исчезновения э. д. с.

11) Плотность энергии магнитного поля

$$W = \frac{B^2}{2\mu} \quad (W = \frac{BH}{8\pi}).$$

12) Энергия магнитного поля тока

$$\mathcal{E} = \frac{LI^2}{2}.$$

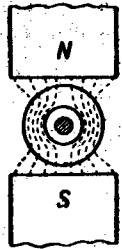


Рис. 32-1.

О 32-1. Ось катушки, имеющей 1000 витков, диаметром 10 см, расположена горизонтально по земному магнитному меридиану. По катушке идет ток 0,5 а. Горизонтальная составляющая земного магнетизма в системе СИ $16 \frac{a}{m}$. Какую работу

надо произвести, чтобы повернуть катушку на 180° ?

О 32-2. Медный провод заключен в железную оболочку, как показано на рисунке 32-1, поэтому магнитное поле в полости железной оболочки слабее наружного. Как это отзывается на электродвижущей силе индукции: а) при движении проводника вместе с железной оболочкой в магнитном поле? б) во время усиления или ослабления магнитного поля при неподвижном проводнике?

О 32-3. В катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигают магнит, и стрелка гальванометра дает отброс. Затем гальванометр заменяют реостатом, сопротивление которого равно сопротивлению гальванометра, и снова с той же скоростью вдвигают магнит. Одинаковы ли величины индукционных токов в этих случаях?

О 32-4. Внутри короткозамкнутой катушки вставлена другая, по которой идет ток от аккумулятора. Во вторую катушку вдвигают железный сердечник, вследствие чего в первой катушке индуцируется ток, и она нагревается. За счет какой работы производится нагревание?

О 32-5. В короткозамкнутую катушку один раз быстро, другой медленно вдвигают магнит. а) Одинаковое ли количество электричества индуцируется в катушке в первый и второй раз? б) Одинаковую ли работу против электромагнитных сил производит сила руки, вдвигающей магнит?

Δ 32-6. Магнит вдвигается в металлическое кольцо, возбуждая в нем индукционный ток. а) Чему равна разность потенциалов между двумя точками на кольце? б) Что покажет гальванометр, присоединенный одними и теми же проводами

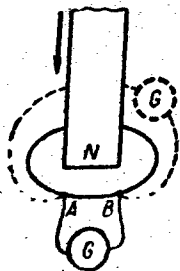


Рис. 32-2.

к точкам A и B кольца: так, как показано сплошной линией, или так, как показано пунктиром на рисунке 32-2?

○ 32-7. В переменном однородном магнитном поле находится сетка, описанная в задаче 26-2 (без подводящих проводов). Что можно сказать про индукционные токи в проводниках, из которых состоит сетка?

○ 32-8. Какие явления происходят в кольце, если в него вдвигается магнит? Рассмотреть случаи: а) кольцо сделано из диэлектрика; б) кольцо сделано из сверхпроводника.

○ 32-9. Горизонтальный металлический стержень вращается около вертикальной оси, проходящей на расстоянии $\frac{1}{k} = \frac{1}{3}$ его длины, с частотой оборотов $n = 2 \text{ сек}^{-1}$. Длина стержня равна $l = 60 \text{ см}$. Определить разность потенциалов между концами стержня, если вертикальная составляющая земного магнитного поля равна $H = 0,5 \text{ э}$.

△ 32-10. При вращении металлических тел электроны удаляются от оси вращения и в теле создается электрическое поле. С какой частотой оборотов должен вращаться около вертикальной оси металлический диск, чтобы электрическое поле в нем отсутствовало? Вертикальную составляющую магнитного поля Земли принять равной в системе СИ $40 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

□ 32-11. Проволочное кольцо ($R = 10 \text{ см}$) находится в постоянном однородном магнитном поле ($B = 100 \text{ гс}$), перпендикулярном плоскости кольца. Центр кольца соединен с ним двумя прямыми проволочками (рис. 32-3). Одна из проволочек (OA) неподвижна, другая (OB) вращается около центра с постоянной угловой скоростью $\omega = 4 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1}$, вследствие чего и по прямым проволочкам, и по кольцу идут индукционные токи. Сопротивление проволочки длиной 1 см равно $\gamma = 10^{-2} \text{ ом}$. Магнитные поля индукционных токов малы по сравнению с наводящим магнитным полем. Определить токи в прямых проволочках и в дугах кольца при следующих положениях: а) $\varphi = 0$; б) $\varphi = \pi$; в) $\varphi = 2\pi$.

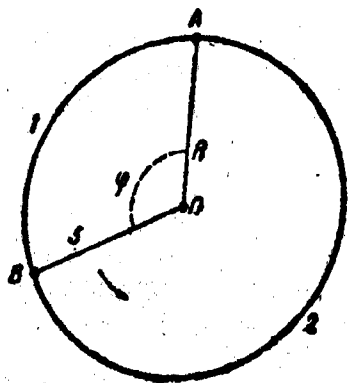


Рис. 32-3.

△ 32-12. В катушке без железного сердечника, имеющей 1000 витков, диаметр сечения 10 см и длину 50 см , величина тока рав-

номерно увеличивается на $0,1 \text{ а}$ за 1 сек (посредством реостата). На катушку надето кольцо из медной проволоки площадью сечения 2 мм^2 . Считая, что магнитные потоки, пронизывающие катушку и кольцо, в любой момент равны между собой, найти ток в кольце.

□ 32-13. Проволочный каркас в виде квадрата с перекладиной, сделанной из той же проволоки (рис. 32-4), находится в однородном переменном магнитном поле, вследствие чего по проволочкам идут индукционные токи. Магнитные поля индукционных токов малы по сравнению с изменениями внешнего магнитного поля. В каком случае индукционные токи выделяют большие количества теплоты: а) перекладина находится на середине квадрата? б) перекладина сдвинута к одной из сторон квадрата? в) перекладина делит площадь квадрата на части в отношении $1:3$?

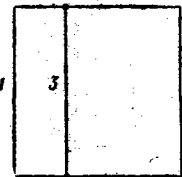


Рис. 32-4.

△ 32-14. Постоянный магнит (магнитный момент которого равен 6000 СГС) длиной 20 см вдвигается в катушку, диаметр основания которой равен 5 см , имеющей обмотку из медной проволоки сечением $0,5 \text{ мм}^2$. Какое количество электричества проходит при вдвигании магнита в катушку по ее обмотке?

△ 32-15. На деревянный цилиндр, длина которого $l = 20 \text{ см}$ значительно больше его диаметра, навиты две медные обмотки сечениями $S = 2 \text{ мм}^2$. Одна из обмоток замкнута накоротко. Какое количество электричества индуцируется в ней, если другую обмотку присоединить к аккумулятору с э. д. с., равной $E = 2 \text{ в}$ и с очень малым внутренним сопротивлением?

△ 32-16. Медный обруч, имеющий массу $m = 5 \text{ кг}$, расположен в плоскости магнитного меридиана. Какое количество электричества индуцируется в нем, если его повернуть около вертикальной оси на 90° ? Горизонтальная составляющая земного магнетизма равна $B_H = 2 \cdot 10^{-5} \text{ тл}$.

○ 32-17. Каков магнитный поток, создаваемый катушкой из 1000 витков, имеющей индуктивность 5 гн , если по катушке течет ток $0,6 \text{ а}$?

○ 32-18. Когда по катушке идет ток, то она вследствие взаимодействия токов стремится изменить свои продольные и поперечные размеры. Как изменяется индуктивность катушки при изменении ее размеров?

○ 32-19. Почему индуктивность катушки сильно зависит от магнитных свойств сердечника, находящегося внутри катушки, и мало зависит от магнитных свойств тел, окружающих катушку?

○ 32-20. Сколько витков надо намотать на картонный цилиндр длиной $l = 60 \text{ см}$, диаметром $d = 5 \text{ см}$, чтобы получить

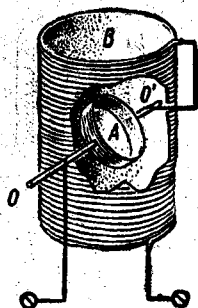


Рис. 32-5.

катушку, индуктивность которой $L = 6 \cdot 10^{-3} \text{ гн}$? Множитель k (см. введение, пункт 7) принять равным 1.

Δ 32-21. На круглом деревянном цилиндре имеется обмотка из медной проволоки, масса которой равна $m = 50 \text{ г}$. Расстояние между крайними витками, равное $l = 60 \text{ см}$, много больше диаметра цилиндра. Сопротивление обмотки $R = 30 \text{ ом}$. Какова ее индуктивность?

○ 32-22. а) Две катушки с индуктивностями $L_1 = 5 \text{ мгн}$ и $L_2 = 3 \text{ мгн}$ включены последовательно и расположены так, что их магнитные поля взаимно усиливают друг друга. Индуктивность этой системы оказалась

равной $L = 11 \text{ мгн}$. Чему равна взаимная индуктивность катушек?

б) Какова будет индуктивность системы катушек, если, не меняя расположения катушек, переменить направление тока в одной из них на обратное?

○ 32-23. Катушка A находится внутри катушки B большего размера и может вращаться около оси OO' , перпендикулярной к осям обеих катушек (рис. 32-5). При каком расположении катушек индуктивность двух последовательно соединенных катушек: а) наибольшая; б) наименьшая; в) равна сумме индуктивностей отдельных катушек?

○ 32-24. Коэффициент k в формуле для вычисления индуктивности катушки (см. введение, п. 7) для однослойной катушки имеет значения, указанные в таблице:

Диаметр Длина	0,00	0,02	0,1	0,2	0,33	0,5	1	2	5	10	100
k	1,00	0,992	0,959	0,920	0,872	0,818	0,688	0,526	0,320	0,203	0,035

Какова причина того, что у длинных катушек коэффициент k больше, чем у коротких того же диаметра?

Δ 32-25. Пользуясь таблицей, приведенной в задаче 32-24, определить индуктивность: а) катушки, намотанной в один слой плотно прилегающих друг к другу витков на деревянный сердечник длиной 10 см и диаметром 5 см . Диаметр проволоки вместе с изоляцией равен $0,5 \text{ мм}$; б) кольца диаметром 10 см , сделанного из проволоки диаметром 1 мм .

Δ 32-26. а) Пользуясь таблицей, приведенной в задаче 32-24, определить взаимную индуктивность двух одинаковых катушек, диаметр которых равен их длине, сложенных вплотную и соединенных последовательно так, что их потоки складываются. Индуктивность каждой из них равна 10 мгн .

б) Какова взаимная индуктивность тех же катушек, если они раздвинуты на расстояние, равное их длине?

Δ 32-27. а) Определить индуктивность катушки с замкнутой магнитной цепью (кольцевой соленоид) при следующих данных: число витков $w = 1000$; площадь сечения магнитопровода $S = 25 \text{ см}^2$; средний диаметр кольца $d = 20 \text{ см}$; ток $I = 1 \text{ а}$. Магнитные свойства железа выражены кривой на рисунке 31-3. б) Тот же вопрос при токе $I_1 = 0,1 \text{ а}$.

Δ 32-28. Каково различие в зависимости индуктивности от величины тока у кольцевых соленоидов с железными сердечниками в виде полых цилиндров, сечения которых изображены на рисунке 32-6?

Δ 32-29. Сердечник соленоида представляет собой кольцо, состоящее из двух сложенных колец, сечения которых S_1 и S_2 и магнитные проницаемости μ_1 и μ_2 . Средняя длина силовых линий в кольце l ; число витков w . Определить индуктивность соленоида.

Δ 32-30. Определить индуктивность петли из двух проводов. Длина петли $l = 1500 \text{ м}$; диаметр проводов $d = 1 \text{ мм}$; расстояние между осями проводов $a = 2 \text{ см}$. Магнитным полем внутри проводов можно пренебречь.

○ 32-31. На катушку, сопротивление и индуктивность которой равны 10 ом и 58 мгн , дается постоянное напряжение. Через сколько времени ток в катушке достигает величины, равной половине установившегося тока?

○ 32-32. На рисунке 32-7 показана схема телеграфной передачи. Аппарат A на станции работает от местной батареи E_2 . Ток от батареи включается посредством реле P , приводимым в действие рабочим током из линии. Сколько времени пройдет после включения ключа K до замыкания местной цепи при таких данных: общее сопротивление всей цепи, включающей

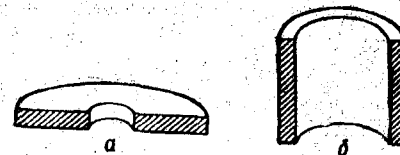


Рис. 32-6.

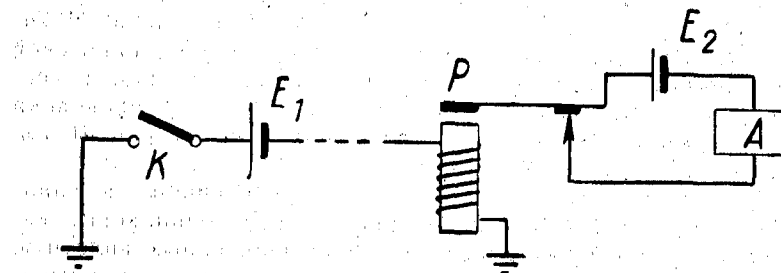


Рис. 32-7.

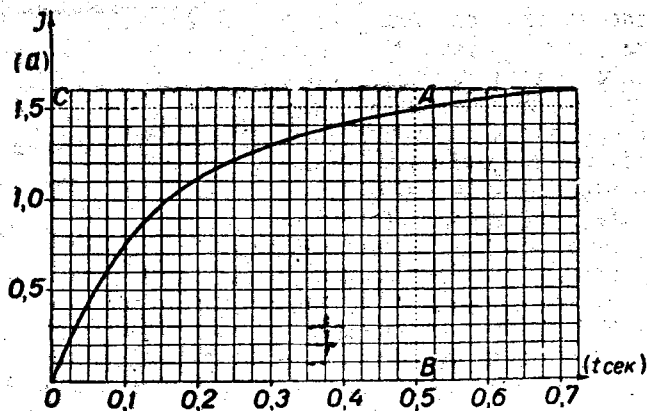


Рис. 32-8.

линию, 80 ом ; индуктивность $0,6 \text{ гн}$; э. д. с. батареи 20 в ; для приведения в действие реле требуется ток $0,2 \text{ а}$?

□ 32-33. Катушка с сопротивлением $0,7 \text{ ом}$ и индуктивностью $0,2 \text{ гн}$ попадает на $0,3 \text{ сек}$ под напряжение 100 в . Как изменится при этом температура меди в катушке, если ее масса $2,5 \text{ кг}$, а изоляция не успеет нагреться?

□ 32-34. На рисунке 32-8 показан график тока в дросселе при приключении к нему источника постоянного тока.

а) Чему равны площади $OABO$ и $OSAO$?

б) Пользуясь графиком, определить индукцию магнитного поля, которая имеет место в сердечнике дросселя через $0,5 \text{ сек}$ по включении тока, если известны следующие данные: обмотка дросселя состоит из медного провода площадью сечения $S=1 \text{ мм}^2$; диаметр сердечника равен $d=5 \text{ см}$; сопротивлением всех частей цепи, кроме обмотки дросселя, можно пренебречь.

Δ 32-35. На рисунке 32-9 изображена схема мостика Уитстона, причем измеряется омическое сопротивление катушки с индуктивностью $L=0,1 \text{ гн}$. Ключи K_1 и K_2 смонтированы в виде двойного ключа так, что при нажатии кнопки сначала замыкается ключ K_1 , а затем ключ K_2 . Передвигая движок D по струне AB , добились, что при медленном нажатии кнопки двойного ключа гальванометр G не дает отброса.

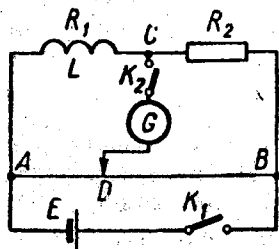


Рис. 32-9.

а) В каком направлении пойдет ток в мостике DC , если нажать двойной ключ слишком быстро?

б) Какова разность потенциалов между точками D и C схемы через $t=0,001 \text{ сек}$ после замыкания ключа K_1 , если сопротивление катушки $R_1=120 \text{ ом}$,

сопротивление $R_2=80 \text{ ом}$, э. д. с. источника тока равна $E=1,4 \text{ в}$? Внутренним сопротивлением источника тока, сопротивлением подводящих проводов и индуктивностью всех частей установки, кроме катушки, можно пренебречь.

Δ 32-36. Катушка с индуктивностью 6 гн и омическим сопротивлением 200 ом и безындуктивное сопротивление 1000 ом присоединены параллельно к магистрали, в которой поддерживается напряжение 120 в (рис. 32-10). Какое напряжение будет между точками A и B схемы через $0,001 \text{ сек}$ после размыкания ключа K ?

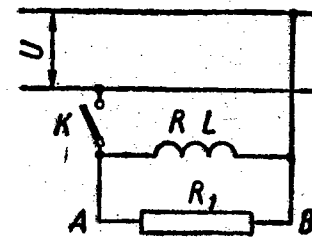


Рис. 32-10.

Δ 32-37. Катушка без железного сердечника имеет $10\,000$ витков диаметром 5 см . Длина катушки равна 50 см . Обмотка сделана из медного провода ($S=0,1 \text{ мм}^2$). Через сколько времени после подключения катушки к батарее аккумуляторов величина тока достигнет значения $I=0,99I_0$, где I_0 — установившаяся величина тока? Таблица значений множителя k приведена в задаче 32-24.

О 32-38. Определить энергию магнитного поля в железном сердечнике объемом 400 см^3 , если индукция равна $12\,000 \text{ гс}$.

О 32-39. Определить энергию магнитного поля для случая, описанного в задаче 31-26.

О 32-40. Имеются две входящие одна в другую катушки одинаковой длины с одинаковым числом витков. Если по обеим катушкам идет одинаковый ток, то плотности энергии магнитного поля в катушках равны между собой. Вставим меньшую катушку в большую так, чтобы магнитные поля их совпали. При этом внутри меньшей катушки плотность энергии учетверится (а не удвоится). За счет чего произойдет увеличение энергии в два раза?

Если же перевернуть внутреннюю катушку, то энергия магнитного поля внутри нее будет равна нулю. Куда она делась?

О 32-41. Обмотка электромагнита имеет сопротивление 10 ом и индуктивность $0,2 \text{ гн}$ и находится под постоянным напряжением. В течение какого промежутка времени t в обмотке выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике?

О 32-42. Какова энергия магнитного поля в катушке длиной в 50 см , имеющей $10\,000$ витков диаметром 25 см , без железного сердечника, если по ней идет ток 2 ма ? (См. задачу 32-24.)

Δ 32-43. Определить энергию магнитного поля на единицу длины бесконечного прямого провода, по которому идет ток I . Дать объяснение полученному результату.

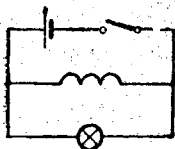


Рис. 32-11.

стью включают лампочку накала на 120 в. Ток на дроссель и лампочку дает батарея аккумуляторов 4—6 в. При этом нить накала лампы нагревается очень слабо. При размыкании тока в дросселе лампочка на мгновение вспыхивает. Определить температуру накала при таких условиях: индуктивность дросселя $L=0,03$ гн; величина тока в нем $I=5$ а; материал нити накала — вольфрам; длина ее $l=43$ см; диаметр $d=0,019$ мм; начальная температура нити накала идет вся энергия магнитного поля в дросселе.

□ 32-46. По обмотке, густо навитой на железный тороид, идет ток, величина которого периодически меняется, достигая то некоторого положительного значения, то такого же по абсолютной величине отрицательного. При этом напряженность магнитного поля в тороиде меняется пропорционально току в обмотке. Зависимость магнитной индукции в железе от напряженности для данного случая представлена на рисунке 32-12 (петля гистерезиса). Вычисляя плотность энергии магнитного поля в железе по формуле, указанной в пункте 11 введения, получим для состояний, соответствующих точкам A , C , D и E графика, значения 0, а для точек L и K отрицательные значения. Как истолковать эти результаты?

□ 32-47. Имеется постоянный магнит в виде кольца с прорезом шириной 4 мм. Средний диаметр кольца равен 10 см, а сечение кольца имеет форму круга, диаметр которого мал по сравнению с диаметром кольца. При таких размерах поле в прорезе можно считать однородным, а площади сечения магнитного потока в прорезе и в кольце равными между собой. Индукция в прорезе равна 100 гс.

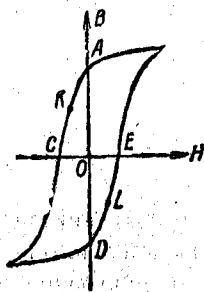


Рис. 32-12.

△ 32-44. а) Определить энергию магнитного поля, если по петле из двух проводов (см. задачу 32-30) идет ток силой 8 а.

б) Решить ту же задачу, считая провод бесконечно тонким.

△ 32-45. Для демонстрации явления самоиндукции при размыкании пользуются следующей установкой (рис. 32-11). Параллельно дросселю с большой индуктивностью

включают лампочку накала на 120 в. Ток на дроссель и лампочку дает батарея аккумуляторов 4—6 в. При этом нить накала лампы нагревается очень слабо. При размыкании тока в дросселе лампочка на мгновение вспыхивает. Определить температуру накала при таких условиях: индуктивность дросселя $L=0,03$ гн; величина тока в нем $I=5$ а; материал нити накала — вольфрам; длина ее $l=43$ см; диаметр $d=0,019$ мм; начальная температура нити накала идет вся энергия магнитного поля в дросселе.

□ 32-46. По обмотке, густо навитой на железный тороид, идет ток, величина которого периодически меняется, достигая то некоторого положительного значения, то такого же по абсолютной величине отрицательного. При этом напряженность магнитного поля в тороиде меняется пропорционально току в обмотке. Зависимость магнитной индукции в железе от напряженности для данного случая представлена на рисунке 32-12 (петля гистерезиса). Вычисляя плотность энергии магнитного поля в железе по формуле, указанной в пункте 11 введения, получим для состояний, соответствующих точкам A , C , D и E графика, значения 0, а для точек L и K отрицательные значения. Как истолковать эти результаты?

□ 32-47. Имеется постоянный магнит в виде кольца с прорезом шириной 4 мм. Средний диаметр кольца равен 10 см, а сечение кольца имеет форму круга, диаметр которого мал по сравнению с диаметром кольца. При таких размерах поле в прорезе можно считать однородным, а площади сечения магнитного потока в прорезе и в кольце равными между собой. Индукция в прорезе равна 100 гс.

а) Какова напряженность магнитного поля в кольце?

б) Какова плотность энергии магнитного поля в кольце?

в) Чему равна сумма энергий магнитных полей в кольце и в прорезе?

Указание. Применить теорему о циркуляции напряженности магнитного поля (введение к § 31, п. 10).

§ 33. Периодические токи

1) Эффективные значения величины тока и напряжения

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt; \quad U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt,$$

где T — период тока; i , u — мгновенные значения тока и напряжения. В тексте задач, где нет специальных оговорок, эффективные значения тока и напряжения обозначаются буквами I и U без индексов.

2) Для синусоидального тока

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

где I_m и U_m — амплитуды тока и напряжения.

3) Средние величины тока и напряжения

$$I_{\text{med}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt; \quad U_{\text{med}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u dt.$$

4) Для синусоидального тока

$$I_{\text{med}} = \frac{2}{\pi} I_m; \quad U_{\text{med}} = \frac{2}{\pi} U_m.$$

5) Закон Ома для синусоидального тока

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

где I и U — эффективные величины (или амплитуды).

6) Кажущееся сопротивление для участка, включающего омическое сопротивление R , индуктивность L и емкость C ,

$$z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

где $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота.

7) Мощность тока при сдвиге фазы φ

$$P = I_{\text{eff}} U_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

8) Активное сопротивление

$$R_A = \frac{P}{I_{\text{eff}}^2} = z \cos \varphi.$$

R_A равно омическому сопротивлению R при отсутствии потерь на нагревание железных сердечников вследствие гистерезиса и токов Фуко, на нагревание диэлектриков в переменном электрическом поле и т. д. При наличии этих потерь $R_A > R$.

Кроме того, при высоких частотах активное сопротивление R_A увеличивается вследствие того, что практически весь ток идет в поверхностных слоях проводника.

9) Сила взаимодействия токов, текущих по проводам длиной l , расположенным параллельно на расстоянии b друг от друга,

$$F = \frac{\mu' l_1 l_2 \cos \varphi}{2\pi b} \quad \left(F = \frac{2\mu l_1 l_2 \cos \varphi}{b} \right).$$

10) Решение задач на переменные токи в последовательно или в параллельно соединенных приборах очень облегчается черчением векторных диаграмм напряжений и токов.

11) Под дросселем, упоминаемым в ряде задач этого параграфа, подразумевается катушка с железным сердечником.

○ 33-1. Эффективный ток равен 7 а. Каков средний ток?

△ 33-2. Переменный ток, выпрямляемый прибором, пропускающим ток только одну половину периода (рис. 33-1), проходя в течение 10 мин по раствору медного купороса, выделил на электроде 200 мг меди. Какова амплитуда тока?

△ 33-3. а) Аккумулятор, емкость которого равна $q=20$ а·ч, заряжают выпрямленным синусоидальным током, график которого показан на рисунке 33-2. Тепловой амперметр, включенный в цепь, показывает ток $I=1,5$ а. Сколько времени надо заряжать аккумулятор? При расчете принять, что на зарядку используется 100% протекающего тока.

б) Сколько времени надо заряжать аккумулятор, если график выпрямленного тока имеет вид, показанный на рисунке 33-1, и если показание теплового амперметра то же?

□ 33-4. Если увеличивать напряжение, под которым находится неоновая лампа, то при напряжении 80 в она вспыхивает. Если затем уменьшать напряжение, то при 70 в лампа гаснет. Лампу присоединяют к сети переменного тока через потенциометр и увеличивают напряжение.

а) При каком эффективном напряжении лампа вспыхнет?

б) Какую долю от общего времени горения лампы составляет продолжительность свечения каждого из электродов, если лампа находится под эффективным напряжением 120 в?

○ 33-5. На рисунке 33-3 показана схема установки для одного из способов измерения подвижностей ионов. В пространство между двумя электродами А и В через сеточный электрод А

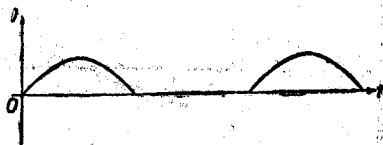


Рис. 33-1.

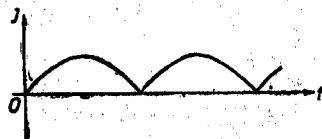


Рис. 33-2.

проникают ионы какого-либо одного знака (например, отрицательные ионы от накаливаемой металлической проволоки). Электроды А и В находятся под переменным (синусоидальным) напряжением, причем амплитуду напряжения можно менять. Увеличивая напряжение переменного тока, добиваются того, что ионы достигают электрода В и гальванометр G начинает давать отклонение.

При измерении подвижности отрицательных ионов кислорода в приборе, в котором расстояние между электродами $d=1$ см, отклонение гальванометра получается при эффективном напряжении, не меньшем $U=61,5$ в. Вычислить подвижность ионов, если частота переменного тока $f=50$ гц.

○ 33-6. Батарея аккумуляторов с э. д. с. $E=40$ в присоединена к сети переменного тока ($U=120$ в) через сопротивление $R=80$ ом (рис. 33-4).

Амперметр A_1 — магнитоэлектрический, A_2 — тепловой.

а) Каковы показания приборов A_1 и A_2 ?

б) Какое количество теплоты выделяется в сопротивлении R за 10 сек? Все сопротивления, кроме R , ничтожно малы.

△ 33-7. Найти соотношение между максимальным, средним и эффективным токами в случае переменного тока, график которого показан на рисунке 33-5.

□ 33-8. Начертить примерные графики напряжения, при котором график тока в приборе имеет форму, показанную на рисунке 33-5. Рассмотреть случаи: а) прибор, по которому идет ток, имеет чисто омическое сопротивление; б) прибор имеет ничтожное омическое сопротивление и значительную индуктивность; в) прибор имеет значительные омическое сопротивление и индуктивность; г) ток идет по конденсатору.

○ 33-9. При каком напряжении по обмотке дросселя, имеющей омическое сопротивление 35 ом и индуктивность 0,1 гн, пойдет ток 3 а? Частота 50 гц.

○ 33-10. Какой емкости конденсатор надо взять, чтобы его емкостная проводимость была эквивалентна проводимости реостата с сопротивлением 500 ом, если частота тока равна: а) 50 гц? б) 50 000 гц?



Рис. 33-3.

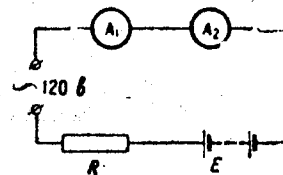


Рис. 33-4.

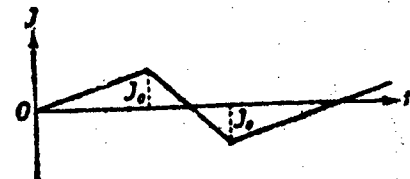


Рис. 33-5.

○ 33-11. В катушке с омическим сопротивлением 10 ом при частоте 50 гц получается сдвиг фазы между напряжением и током, равный 60° . Определить индуктивность катушки.

△ 33-12. На картонный цилиндр длиной $l=50\text{ см}$ и диаметром $d_2=5\text{ см}$ навиты $\omega=500$ витков медного провода диаметром $d_1=0,5\text{ мм}$. При какой частоте f кажущееся сопротивление такой катушки в $n=2$ раза больше ее омического сопротивления?

□ 33-13. а) Кольцо, диаметр которого $d_1=10\text{ см}$, сделанное из медной проволоки диаметром $d_2=1\text{ мм}$, вращается в однородном магнитном поле ($B=10\text{ гс}$) с частотой оборотов $n=10\text{ сек}^{-1}$. Индуктивность кольца таких размеров $L=350\text{ см}$ (см. задачу 32-24). Определить эффективный ток в кольце. б) Каков был бы ток в кольце, если бы его сопротивление было близко к нулю (или в случае сверхпроводника)? Пренебречь уменьшением индуктивности из-за скин-эффекта.

△ 33-14. На деревянное кольцо, диаметр которого $d=30\text{ см}$, а поперечное сечение имеет вид круга, навита обмотка из медной проволоки, масса которой $m=2\text{ кг}$. Обмотку присоединяют сначала к сети постоянного тока, затем к сети переменного тока ($f=50\text{ гц}$), причем эффективное напряжение равно напряжению постоянного тока. В каком случае потребляется большая мощность?

△ 33-15. Обмотка дросселя, имеющая ничтожное омическое сопротивление и значительную индуктивность, находится под напряжением, меняющимся с течением времени по закону синуса. Гистерезис в железном сердечнике дросселя выражен слабо, и им можно пренебречь.

Токи Фуко тоже ничтожно малы. Изменения магнитного потока значительны, и часть периода проходит при насыщении.

а) Является ли близким к синусоидальному ток, идущий по обмотке дросселя?

б) Является ли близким к синусоидальному магнитный поток в сердечнике дросселя?

○ 33-16. Начертить векторные диаграммы напряжений и токов для случаев, изображенных на схемах рисунка 33-6.

○ 33-17. Начертить векторные диаграммы токов и напряжений для случаев, изображенных на схемах рисунка 33-7.

○ 33-18. Какой ток пойдет по последовательно соединенным конденсатору ($C=20\text{ мкф}$) и безындук-

тивному сопротивлению ($R=150\text{ ом}$), если дать на них напряжение ($U=110\text{ в}$; $f=50\text{ гц}$)? Какое напряжение будет на каждом приборе?

○ 33-19. По последовательно соединенным дросселю и конденсатору (10 мкф) идет ток 1 а . Частота 50 гц . Омическое сопротивление дросселя 120 ом . Общее напряжение 220 в . Определить индуктивность дросселя.

○ 33-20. К сети переменного тока (120 в ; 50 гц) присоединены параллельно конденсатор (20 мкф) и дроссель (100 ом ; $0,5\text{ гн}$). Определить токи в конденсаторе, дросселе и общий.

○ 33-21. Параллельно соединенные реостат (60 ом) и дроссель (20 ом ; $0,05\text{ гн}$) присоединены к сети переменного тока (50 гц). По дросселю идет ток 4 а . Какой ток идет по реостату и какой ток поступает из сети?

△ 33-22. Катушка, индуктивность которой равна $0,1\text{ гн}$ и омическое сопротивление 2 ом , соединена последовательно с конденсатором. Эта система присоединена к источнику переменного тока.

а) Какова должна быть емкость конденсатора, чтобы при частоте 50 гц по катушке шел наиболее сильный ток?

б) Конденсатор выдерживает напряжение не более 400 в . Какое максимальное напряжение можно дать на эту систему без опасности пробить конденсатор?

○ 33-23. Измерительные приборы на щитке у генератора переменного тока показывают ток 540 а , напряжение 235 в и мощность 108 ват . Каков сдвиг фазы φ ?

○ 33-24. Определить потери мощности в проводке от магистрали к потребителю при следующих данных: передаваемая мощность 100 ват ; напряжение на станции 220 в ; сопротивление проводки $0,01\text{ ом}$; сдвиг фазы 37° .

△ 33-25. Дроссель, соединенный последовательно с безындуктивным сопротивлением $R=20\text{ ом}$, присоединен к сети с напряжением $U=120\text{ в}$ ($f=50\text{ гц}$). При этом дроссель находится под напряжением $U_2=91\text{ в}$, а сопротивление R — под напряжением $U_1=44\text{ в}$. Какие мощности (P_2 и P_1) поглощаются дросселем и сопротивлением?

△ 33-26. Дроссель и безындуктивное сопротивление 50 ом присоединены параллельно к сети синусоидального тока. По дросселю идет ток $2,8\text{ а}$, по сопротивлению — ток $2,5\text{ а}$; из сети потребляется ток $4,5\text{ а}$. Определить мощность, потребляемую дросселем и сопротивлением.

△ 33-27. Омическое сопротивление дросселя равно 14 ом , активное 17 ом , кажущееся 40 ом . Определить потери мощности

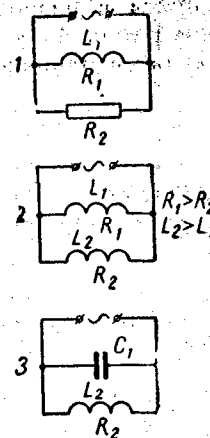


Рис. 33-7.

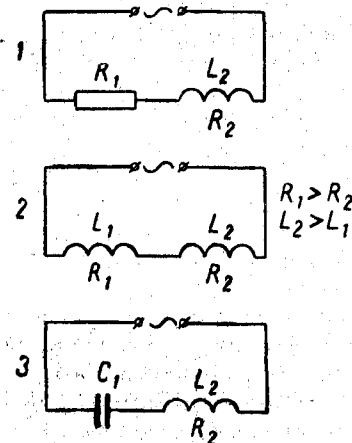


Рис. 33-6.

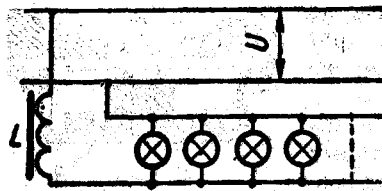


Рис. 33-8.

противлением $R_0=1$ ом осветительная сеть жилой квартиры (рис. 33-8).

а) Под каким напряжением U , находятся лампы в квартире, если общий потребляемый ток равен $I_0=2$ а?

б) Какова может быть максимальная мощность, потребляемая сетью в квартире?

в) Какая мощность будет потребляться дросселем, если в квартире произойдет короткое замыкание?

□ 33-29. По обмотке дросселя идет переменный ток 2 а ($f=50$ гц). Ток вызывает в сердечнике дросселя максимальную напряженность 10 э. Объем сердечника 50 см³. На рисунке 33-9 показана петля гистерезиса для железа, из которого сделан сердечник. Омическое сопротивление обмотки сердечника равно 0,7 ом. Токи Фуко в сердечнике практически отсутствуют.

а) Определить мощность, затрачиваемую на нагревание железного сердечника вследствие гистерезиса.

б) Определить активное сопротивление дросселя.

Δ 33-30. В раствор медного купороса ($\rho=40$ ом·см) опущены две медные пластинки. Электрическую проницаемость раствора можно принять равной $\epsilon=80$ СГС. При какой частоте f емкостная и омическая проводимости равны между собой?

Δ 33-31. Диэлектрик с электрической проницаемостью $\epsilon=2,8$ СГС употреблен

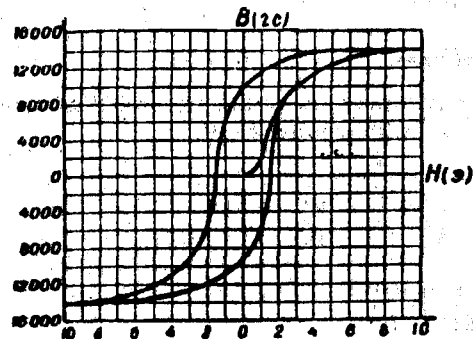


Рис. 33-9.

в качестве изолятора в конденсаторе. Конденсатор, находясь под напряжением, поглощает некоторую мощность, причем при $f=50$ гц коэффициент мощности $\cos \phi=0,1$. Определить удельное сопротивление диэлектрика.

○ 33-32. По двум параллельным проводам текут токи 5 а и 15 а одной и той же частоты,

отличающиеся между собой по фазе на 60° . С какой силой притягиваются друг к другу части проводов длиной 1 м, если расстояние между ними 3 см?

○ 33-33. По двум параллельным проводам текут токи, частоты которых равны 500 гц и 503 гц. Как они взаимодействуют?

Δ 33-34. Какой груз может удерживать электромагнит, питаемый переменным током, если максимальная индукция $B_m=10\,000$ гс, площадь соприкосновения $S=2$ см²? Предположить, что индукция меняется по закону $B=B_m \sin \omega t$ и что за отрезок периода, в течение которого индукция настолько мала, что электромагнит не может удержать груза, он не успевает упасть.

□ 33-35. На рисунке 33-10 изображен разрез телефона: М — мембрана; К — обмотка; А — постоянный магнит; В — полюсные наконечники из мягкого железа.

а) С какой целью вводится в конструкцию телефона постоянный магнит?

б) Какова амплитуда силы, действующая на мембрану, при прохождении по обмотке тока $I=I_m \sin \omega t$ при следующих данных: амплитуда тока $I_m=2 \cdot 10^{-4}$ а; индукция в воздушном промежутке при отсутствии тока в обмотке $B_0=800$ гс; сечение каждого из полюсных наконечников имеет площадь $S=15$ мм²; число витков в обмотке $\omega=400$; длина воздушного зазора $l=0,2$ мм.

При расчете пренебречь магнитным сопротивлением всех участков магнитной цепи, кроме воздушных, и принять во внимание, что индукция постоянного магнита значительно больше индукции, создаваемой током в сердечниках катушки.

○ 33-36. Первичная обмотка понижающего трансформатора находится под напряжением 120 в и потребляет ток 0,5 а. Вторичная обмотка дает ток на лампу накала 3 а при напряжении 10 в. Коэффициент полезного действия 0,7. Определить сдвиг фазы в первичной обмотке.

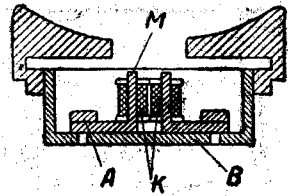


Рис. 33-10.

§ 34. Электрические колебания

1) Период свободных колебаний в контуре, включающем емкость C , индуктивность L и сопротивление R ,

$$T=2\pi \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{4L^2}}}$$

или при

$$\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{4L^2}$$

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

2) Ток при затухающих колебаниях

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin \omega t,$$

где $\omega = 2\pi f$.

3) Логарифмический декремент затухания

$$\delta = \frac{R}{2L} T.$$

○ 34-1. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью $0,07 \text{ гн}$ и плоского конденсатора с площадью обкладок $0,45 \text{ м}^2$, разделенных парафинированной бумагой толщиной $0,1 \text{ мм}$. Определить период колебаний. Сопротивление ничтожно мало.

○ 34-2. Максимальное напряжение в колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивностью $L=5000 \text{ см}$ и конденсатора емкостью $C=12\,000 \text{ см}$, равно $U_0=1,2 \text{ в}$. Сопротивление ничтожно мало.

а) Определить эффективную величину тока в контуре.

б) Определить максимальное значение магнитного потока, если число витков катушки $\omega=28$.

△ 34-3. Контур состоит из катушки индуктивностью $30\,000 \text{ см}$ и сопротивлением 1 ом и из конденсатора емкостью 2000 см . Какую мощность должен потреблять контур, чтобы в нем поддерживались незатухающие колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе равно $0,5 \text{ в}$?

○ 34-4. Батарея, состоящая из двух конденсаторов емкостью по 2 мкф каждый, разряжается через катушку ($L=1 \text{ мгн}$; $R=50 \text{ ом}$).

Возникнут ли при этом колебания, если конденсаторы соединены: а) параллельно? б) последовательно?

△ 34-5. Как изменится логарифмический декремент затухания, если, не меняя длины катушки в контуре, увеличить число витков на ней в n раз (считать, что диаметр витков остается без изменения)?

△ 34-6. Какова относительная ошибка, которая будет сделана, если воспользоваться формулой $T=2\pi\sqrt{LC}$ для вычисления периода колебания контура, состоящего из емкости $C=5000 \text{ см}$ и катушки, сделанной из медной проволоки, площадью сечения $S=0,2 \text{ мм}^2$. Длина катушки $l=50 \text{ см}$. Диаметр катушки мал по сравнению с ее длиной.

△ 34-7. Определить логарифмический декремент затухания контура с емкостью $C=2000 \text{ см}$ и индуктивностью $L=150\,000 \text{ см}$, если на поддержание в этом контуре незатухающих колебаний с максимальным напряжением $U_m=0,9 \text{ в}$ требуется мощность $P=10 \text{ мквт}$.

△ 34-8. В контуре, состоящем из катушки и конденсатора переменной емкости, создаются вынужденные колебания. Если

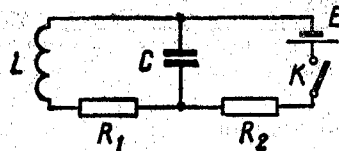


Рис. 34-1.



Рис. 34-2.

емкость увеличить на $\beta=0,01$ емкости, соответствующей максимуму колебаний, то величина тока в контуре убывает в $n=1,5$ раза. Определить логарифмический декремент затухания.

□ 34-9. В установке, собранной по схеме на рисунке 34-1, все сопротивления, кроме $R_1=1 \text{ ом}$ и $R_2=50 \text{ ом}$, ничтожно малы. Индуктивность катушки $L=0,1 \text{ гн}$, емкость конденсатора $C=1 \text{ мкф}$, э. д. с. элемента $E=1,4 \text{ в}$. Ключ K замыкают и, после того как ток в катушке L установится, размыкают.

а) Какова начальная энергия колебаний, которые будут иметь место в контуре LC после размыкания ключа K ?

б) Какова энергия колебаний через $0,2 \text{ сек}$ после размыкания ключа?

□ 34-10. Контур состоит из катушки с сопротивлением $R=14 \text{ ом}$ и индуктивностью $L=10^{-5} \text{ гн}$ и конденсатора емкостью $C=0,002 \text{ мкф}$. Конденсатор C заряжается от батареи аккумуляторов (рис. 34-2), а затем присоединяется к катушке L .

а) Найти логарифмический декремент затухания колебаний, которые начнутся в контуре.

б) Какая доля периода соответствует переходу величины тока от нуля до максимального значения?

в) Найти отношение между энергиями магнитного поля в катушке и электрического поля в конденсаторе в момент максимума тока.

г) Какая доля периода соответствует переходу напряжения от максимального значения до нуля?

д) Каково значение величины I_0 в формуле тока (см. п. 2 введения), если э. д. с. батареи равна $3,5 \text{ в}$?

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

§ 35. Волны

- 1) Связь длины волны λ , скорости волн c и частоты колебаний f

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

- 2) Скорость продольных волн в тонких стержнях

$$c = \sqrt{\frac{E}{D}},$$

где E — модуль упругости (модуль Юнга), D — плотность.

- 3) Скорость продольных волн в неограниченной упругой среде

$$c = \sqrt{\frac{K}{D}},$$

где K — модуль всестороннего сжатия.

- 4) Скорость поперечных (сдвиговых) волн в неограниченной упругой среде

$$c = \sqrt{\frac{G}{D}},$$

где G — модуль сдвига.

- 5) Скорость поперечных волн в натянутой нити (струне)

$$c = \sqrt{\frac{F}{SD}},$$

где F — сила, растягивающая нить; S — площадь поперечного сечения нити. Формула справедлива в том случае, когда напряжение, вызванное сдвигом, мало по отношению к напряжению, вызванному растягивающей силой.

- 6) Скорость волн в газах

$$c = \sqrt{\frac{p\kappa}{D}},$$

где κ — отношение удельных теплоемкостей газа $\frac{c_p}{c_v}$.

Для идеальных газов

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{\mu}},$$

здесь R — универсальная газовая постоянная; μ — молекулярный вес.

- 7) Связь между амплитудой давления в продольных волнах Δp , скоростью волн и амплитудой волновой скорости v_m

$$\Delta p = v_m D c.$$

Здесь под D разумеется средняя плотность среды.

- 8) Поток энергии в волновом поле сквозь 1 см^2 площадки, поставленной перпендикулярно к скорости волн, за 1 сек (вектор Умова)

$$S = \Delta p v,$$

здесь Δp — волновое давление (разность между давлением в волновом поле и давлением в той же среде при отсутствии волнового процесса), v — волновая скорость.

- 9) Интенсивность продольных волн

$$I = S_{\text{средн}} = \frac{(\Delta p_m)^2}{2Dc}.$$

- 10) Затухание волн

$$I = I_0 e^{-\beta x},$$

где β — коэффициент поглощения, I и I_0 — интенсивности плоских волн в начале и в конце расстояния x .

- 11) Скорость электромагнитных волн в среде с электрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

- 12) Вектор Умова — Пойнтинга

$$S = EH \quad \left(S = \frac{EH}{4\pi} \right).$$

○ 35-1. Скорость продольных волн в стальном стержне равна $5100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Определить модуль упругости у стали.

○ 35-2. Какова скорость продольных волн в ртути?

△ 35-3. При повышении температуры от 20 до 100°C скорость продольных волн в медном стержне убывает на $7,4\%$ скорости при 20°C . Каков средний температурный коэффициент модуля упругости в этом интервале температур?

△ 35-4. Почему в неограниченном твердом теле невозможны волны, в которых направление колебаний составляет с направлением распространения волн угол, отличный от 0° (продольные волны) и от 90° (поперечные волны)?

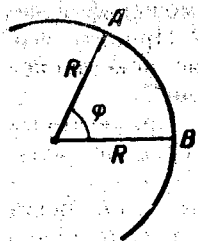


Рис. 35-1.

Δ 35-5. Скорость продольных волн в земной коре равна $14 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$; скорость поперечных волн $7,5 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$. Определить угловое расстояние от центра землетрясения A (гипоцентра) до сейсмической станции B (рис. 35-1), если по записи сейсмографа видно, что продольные колебания пришли на 91 сек раньше поперечных (при такой величине Δt можно предполагать, что волны идут только по земной коре).

Δ 35-6. От поверхности Земли вертикально вверх идут воздушные волны. Через какой отрезок времени они дойдут до высоты 10 км, если температура воздуха у поверхности Земли равна 16°С, а градиент температуры в атмосфере равен $-0,007 \frac{\text{град}}{\text{м}}$?

○ 35-7. Скорость продольных волн в кислороде при нормальных условиях равна $3,172 \cdot 10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Определить отношение $\frac{c_p}{c_v}$.

○ 35-8. Найти отношение между скоростью продольных волн в газе и средней скоростью теплового движения молекул в нем.

○ 35-9. При отражении упругих волн, падающих на границу между двумя средами с разными волновыми сопротивлениями, происходит изменение направления вектора Умова на обратное, т. е. меняется или знак Δp, или знак v. В каком случае происходит первое изменение и в каком второе?

○ 35-10. Определить частоту колебаний в трубе длиной 80 см при температуре воздуха 16°С: а) открытой; б) закрытой.

Δ 35-11. Две одинаковые закрытые трубы длиной по 60 см вследствие неодинаковости температуры воздуха в них дают 1 биение в секунду. Температура воздуха в трубе, дающей более низкий тон, равна 16°С. Какова температура воздуха в другой трубе?

○ 35-12. Две одинаковые струны длиной по 1 м настроены в унисон. Если одну из струн укоротить на 0,5 см, то струны при звучании дают биения с частотой 2 гц. Определить частоту тона струны (до укорачивания).

○ 35-13. На нити образовались стоячие волны, причем расстояния между точками, в которых колебания происходят с амплитудой 3 мм, равны 3 и 7 см. Найти длину волны и амплитуду в середине пучности.

Δ 35-14. На нити образовались стоячие волны. Какую долю натяжения нити (при отсутствии волн) составляет амплитуда

колебаний натяжения в узлах, если амплитуда смещений в середине нити равна 0,1 расстояния между узлами? Принять, что проекция силы натяжения нити на направление покоящейся нити равна силе ее натяжения при отсутствии волн.

○ 35-15. Определить три наименьшие частоты, при которых в медном стержне длиной 90 см, закрепленном посередине, получатся стоячие продольные волны.

○ 35-16. По цилиндрической трубе диаметром 5 см бегут синусоидальные воздушные волны. Интенсивность волн равна $8 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$, частота 300 гц.

а) Какую энергию несет каждая волна?

б) Какова средняя и максимальная плотность энергии в волнах, если температура воздуха равна 10°С?

Δ 35-17. Определить полную мощность источника продольных волн в воздухе, если в любом направлении на расстоянии 100 м от него амплитуда давления равна $0,9 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$. Давление нормальное, температура воздуха 20°С, затухание ничтожно.

Δ 35-18. Интенсивность волн на расстоянии 20 м от источника равна $0,03 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$. Какова интенсивность волн на расстоянии 100 м от источника, если коэффициент затухания равен $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$?

○ 35-19. Плотность энергии в некоторой точке волнового поля спустя 0,01 сек после прохождения максимума синусоидальной волны равна 0,2 максимальной. Какова частота?

○ 35-20. Определить длину волны, соответствующую колебательному контуру, состоящему из катушки с индуктивностью $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ гн}$ и конденсатора емкостью $3 \cdot 10^{-2} \text{ мкф}$. Сопротивление ничтожно мало.

○ 35-21. Какова скорость электромагнитных волн в керосине?

○ 35-22. Имеются два параллельных провода, одни концы которых изолированы, а другие связаны индуктивной или емкостной связью с генератором колебаний (рис. 35-2, а). При

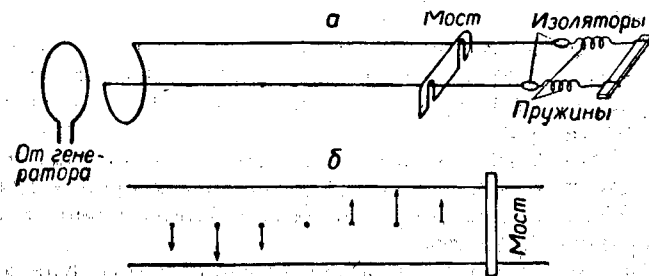


Рис. 35-2.

надлежащем подборе частоты колебаний в системе возникают стоячие волны.

а) Зависит ли длина стоячих волн от толщины проводов и от расстояния между ними?

б) На рисунке 35-2, б показаны стрелками разной длины напряженности электрического поля в точках, находящихся посередине между проводами на протяжении одной стоячей волны для момента, когда токи в проводах и магнитное поле отсутствуют. Где на проводах находятся положительные и отрицательные заряды? Изобразить их распределение вдоль проводов крестиками и минусами разных размеров, соответственно их плотностям.

в) Что будет иметь место через одну четверть периода? Изобразить распределение токов в проводах и в медной пластине (мост) стрелками разной длины. Изобразить напряженности магнитного поля в точках, находящихся на середине расстояния между проводами, значками \oplus и \ominus разной величины.

г) Каковы будут напряженности электрического и магнитного полей через 0,5 периода и через 0,75 периода? Сделать соответствующие рисунки.

д) От чего зависит амплитуда колебаний в системе? Почему при увеличении числа стоячих волн, образующихся в системе (что достигается отодвиганием моста дальше от генератора), амплитуда колебаний уменьшается?

е) Расстояние между двумя пучностями в системе при проволочках, опущенных в спирт, равно 40 см. Какова частота колебаний?

Указание. При ответах на все вопросы, кроме вопроса д), принимать, что сопротивление проводов ничтожно мало.

△ 35-23. Излучение антенны полевой радиостанции имеет мощность 50 Вт. Какова средняя напряженность электрического поля при приеме на наземную антенну на расстоянии 80 км?

Указание. Принять во внимание, что интенсивность излучения направлению, перпендикулярному к антенне, в три раза больше той, которая имела бы место при равномерном излучении по всем направлениям.

○ 35-24. Три наблюдателя находятся на одной прямой на расстоянии 10 км друг от друга и измеряют среднюю напряженность электрического поля в электромагнитных волнах, излучаемых некоторым источником. Где находится источник волн, если напряженность поля у крайних наблюдателей одинакова, а у среднего на 10% больше?

△ 35-25. На рисунке 35-3, а показаны две системы плоских электромагнитных волн (I и II); длины волн одинаковы; направления движения составляют угол 2α . Векторы E лежат в плоскости чертежа и изображены стрелками. Векторы H перпендикулярны к плоскости чертежа и изображены кружками с точкой (вектор направлен на читателя) или с крестиком (век-

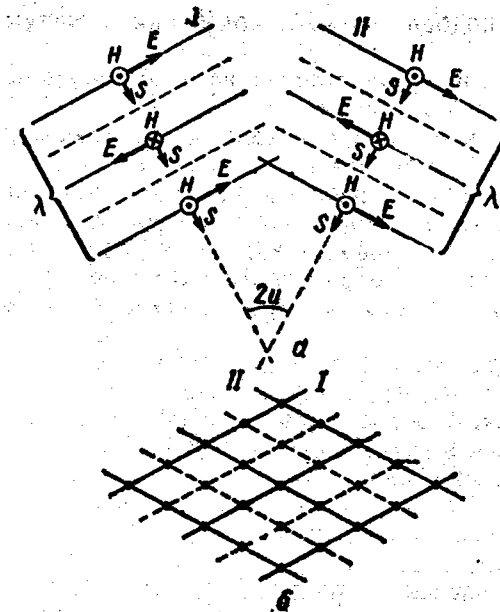


Рис. 35-3.

тор направлен от читателя). Показаны также векторы Умова — Пойнтинга S для тех же точек. На рисунке 35-3, б те же системы волн показаны наложенными друг на друга.

а) Начертить векторы Умова — Пойнтинга во всех точках волнового поля, показанных на рисунке 35-3, б черными кружками.

б) Найти расстояние x между направлениями, в которых векторы Умова — Пойнтинга имеют максимальное значение, если угол $2\alpha = 1^\circ$ и длины волн равны $\lambda = 0,5$ мкм.

□ 35-26. Предположим, что две цепочки электронов движутся параллельно друг другу в пустоте со скоростью в n раз меньшей скорости света. Что больше: сила, с которой цепочки электронов отталкиваются вследствие электростатического взаимодействия, или сила, с которой они притягиваются вследствие магнитного взаимодействия?

§ 36. Звуковые явления

1) Уровень ощущения звука

$$L = \lg \frac{I}{I_0} = 2 \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_0},$$

где индексами 0 отмечены величины, соответствующие порогу ощущения для звука данной частоты.

2) Принцип Доплера. Воспринимаемая частота:

а) в случае движения источника звука частоты f со скоростью v

$$f' = f \frac{1}{1 \pm \frac{v}{c}},$$

где c — скорость звука;

б) в случае движения наблюдателя

$$f'' = f \left(1 \pm \frac{v}{c}\right).$$

О 36-1. Какую долю от средней скорости молекул воздуха составляет максимальная акустическая скорость молекул при плоских волнах:

а) амплитуда давления $\Delta p_1 = 900 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ (сильный звук, вызывающий боль в ушах)?

б) $\Delta p_2 = 9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ (еле слышный звук).

Давление воздуха нормальное.

О 36-2. Какова амплитуда колебаний в звуковой волне в воздухе при речи средней громкости (максимальное давление около $9 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$) при частоте 400 гц? Давление нормальное, температура воздуха 20° С.

О 36-3. В воздухе при температуре 27° С и при нормальном давлении идет звуковая волна, максимальное давление которой $900 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ (сильный звук, вызывающий боль в ушах). Определить температуру в месте максимального давления.

О 36-4. Иногда на большом расстоянии голос слышен, но слов разобрать нельзя. Чем это объясняется?

О 36-5. Два звука разнятся по уровню ощущения на 1 дб. Каково: а) отношение их интенсивностей? б) отношение амплитуд давлений?

О 36-6. При амплитуде давления $1 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$ уровень ощущения звука равен 60 дб. Какова амплитуда давления для звука той же частоты при пороге слышимости?

Δ 36-7. Звук распространяется по трубе длиной 50 м. Средний коэффициент поглощения можно принять равным 10^{-4} см^{-1} . Каков уровень ощущения звука у конца трубы, если у начала он равен 60 дб?

Δ 36-8. На расстоянии 10 м от источника звука, размеры которого малы, уровень ощущения звука равен 20 дб. Пренебрегая затуханием, вычислить:

а) уровень ощущения на расстоянии 5 м;

б) на каком расстоянии звук не слышен.

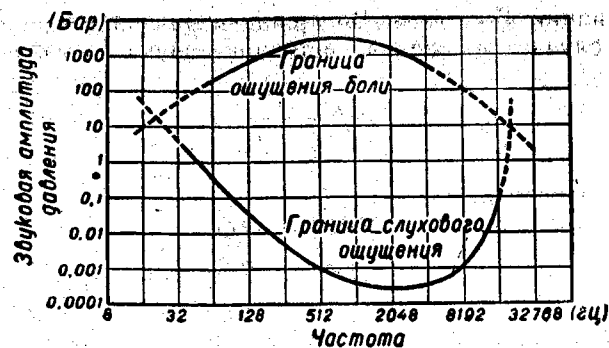


Рис. 36-1.

Δ 36-9. Наблюдатель, находящийся на расстоянии 10 м от звучащего камертона, отметил исчезновение звучания камертона на 20 сек раньше, чем наблюдатель, находящийся на расстоянии 1 м. Определить коэффициент затухания колебаний камертона.

Δ 36-10. На рисунке 36-1 дана диаграмма, показывающая свойства человеческого слуха (амплитуды давлений даны в $\frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$). Пользуясь ею, определить:

а) интенсивность звука при нижней границе слуха (порог слышимости) и при верхней границе слуха (ощущение боли) для частот 256 гц и 2048 гц;

б) уровень ощущения звука при амплитуде давления $1 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$ для частот 32 гц и 2048 гц;

в) уровень ощущения звука при мощности источника звука 10^{-5} вт (человеческая речь) при частоте 256 гц на расстоянии 5 м;

г) мощность источника звука при уровне ощущения на 50 дб на расстоянии 10 м (частота 1024 гц).

Указание. При пользовании диаграммой на рисунке ограничиваться следующими приближенными значениями: $\lg 1,6=0,2$; $\lg 2=0,3$; $\lg 3=0,5$; $\lg 4=0,6$; $\lg 5=0,7$; $\lg 6=0,8$; $\lg 8=0,9$.

Δ 36-11. В струнных музыкальных инструментах (например, в рояле) для низких тонов применяют стальную проволоку того же диаметра, как струн средних и высоких тонов. Так как для низких тонов нужна большая масса струны, то на проволоку навивают медную проволоку (канитель), не доводя ее до самых концов струны.

а) Почему нельзя для струн низких тонов применять толстую стальную проволоку без канители?

б) Как влияет наличие канители на затухание основного тона и обертонов?

○ 36-12. Частота основного тона гудка паровоза 650 гц. Какова кажущаяся частота гудка для наблюдателя, к которому паровоз приближается со скоростью $54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$? Температура воздуха 16°C .

○ 36-13. а) Наблюдателю, слушающему гудок автомобиля, кажется, что при приближении автомобиля основной тон гудка на секунду выше (т. е. частота больше в $\frac{9}{8}$ раза), чем при удалении. Определить скорость автомобиля, приняв скорость звука в воздухе равной $340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Считать воздух неподвижным.

б) Тот же вопрос в случае, если гудок неподвижен, а наблюдатель находится на автомобиле, сначала приближающемся, затем удаляющемся от гудка.

○ 36-14. Паровоз, движущийся со скоростью $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, дает свисток в течение 2 сек. Какова продолжительность звука, воспринятого неподвижным наблюдателем: а) если паровоз приближается к нему? б) если паровоз удаляется от него? Температура воздуха -17°C .

§ 37. Законы освещения

1) Освещенность E при силе света I на расстоянии r от точечного источника света при угле падения света α

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

2) Связь между световым потоком F и средней силой света $I_{\text{ср}}$

$$F = 4\pi I_{\text{ср}}.$$

3) Светность R и яркость B источника света

$$R = \frac{\Delta F}{\Delta S}; \quad B = \frac{\Delta I}{\Delta S},$$

где ΔF — суммарный световой поток, излучаемый площадкой ΔS ; ΔI — сила света, излучаемого поверхностью ΔS в направлении нормали. Если тело излучает по закону Ламберта (сила света пропорциональна косинусу угла между направлением излучения и нормалью), то $R = \pi B$.

4) Световой поток монохроматического света с длиной волны 551 нм, равный 1 люмену, имеет мощность 0,0016 вт.

○ 37-1. На рисунке 37-1 показана кривая видности, дающая чувствительность нормального глаза к световым волнам разной длины. Какова мощность светового потока в 1 лм, если свет монохроматический и длина волны равна: а) 610 нм; б) 520 нм?

○ 37-2. Определить освещенность на расстоянии 4 м от источника света, если сила света равна 180 св и если лучи падают под углом 37° .

△ 37-3. Над полусферой находится точечный источник света ($I = 50 \text{ св}$) на высоте, равной диаметру полусферы (рис. 37-2). Определить освещенность в той точке поверхности полусферы, в которой лучи падают под углом 35° . Радиус полусферы равен 1 м.

△ 37-4. Точечный источник света S освещает поверхность MN (рис. 37-3). Как изменится освещенность в точке A , в ко-

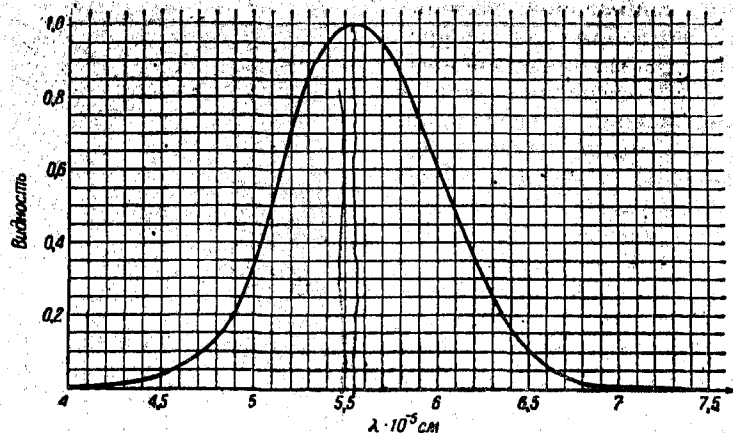


Рис. 37-1.

торой лучи от S падают на поверхность нормально, если сбоку S на таком же расстоянии, как и освещаемая поверхность поместить зеркало Z , отражающее свет в A ? Коэффициент отражения принять равным 1.

Δ 37-5. Проектор заливающего света установлен на высоте 15 м над освещаемой площадью. В некоторой точке площади освещенность горизонтальной поверхности равна 10 лк, а наибольшая освещенность вертикальной плоскости 20 лк. Определить силу света прожектора по направлению к этой точке.

Δ 37-6. Над горизонтальной поверхностью MN помещены на высоте 2 м и на расстоянии 1 м друг от друга два источника света, дающие световые потоки по 300 лм каждый. Определить освещенность на поверхности MN : а) в точках под источниками света; б) на середине расстояния между ними.

Δ 37-7. На рисунке 37-4 показана кривая распределения силы света для «условной» лампы, дающей световой поток

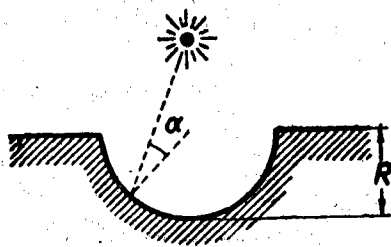


Рис. 37-2.

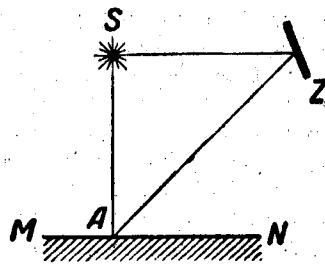


Рис. 37-3.

1000 лм, снабженной светильником (прибором для распределения света); предназначенным для освещения улиц и больших цехов. В светильник помещена лампа, дающая поток 3050 лм (200 ат). Светильник подвешен на высоте 5 м над землей. Определить освещенность мостовой:

а) в точке A , находящейся под светильником;

б) в точке B , удаленной на 7 м от точки A ;

в) те же вопросы для лампы без светильника (пунктирная линия).

Δ 37-8. По вершинам равностороннего треугольника помещены три одинаковых источника света. Показать, что маленькая пластинка, помещенная в центре треугольника под произвольным углом к сторонам треугольника, освещена одинаково с обеих сторон.

Δ 37-9. Для печатания фотоснимка при лампе, дающей силу света 40 св на расстоянии 1 м, требуется продолжительность печатания

2 сек. Какая требуется продолжительность печатания при лампе 30 св на расстоянии 1,5 м? Предполагается, что общее количество энергии, полученной фотоснимком, должно быть в первом и втором случаях одинаково.

Δ 37-10. При фотографировании объекта, освещенного 100-ваттной лампой на расстоянии 1 м, требуется экспозиция 8 сек. Какова должна быть продолжительность экспозиции при освещении двумя 100-ваттными лампами на расстояниях 3 и 4 м, если общее количество энергии, попавшей на светочувствительную пластинку, должно быть таким же?

Δ 37-11. Рисунок 37-5 показывает орбиту Земли T вокруг Солнца S . На рисунке проведена произвольная прямая ASB . Показать, что

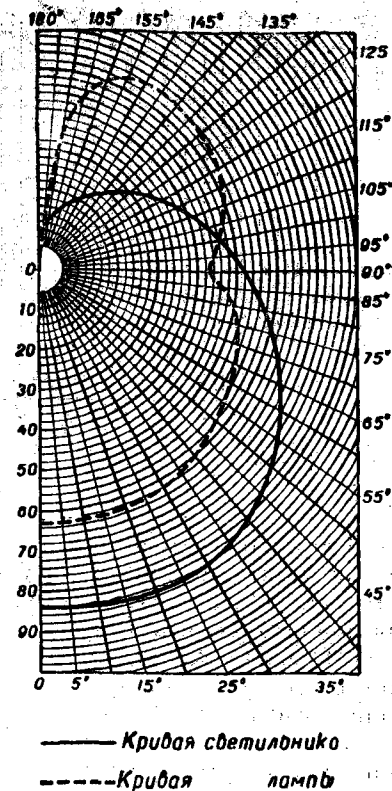


Рис. 37-4.

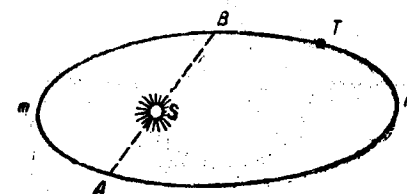


Рис. 37-5.

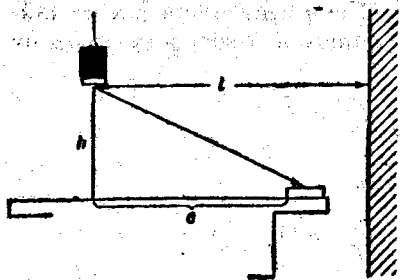


Рис. 37-6.

общие количества световой энергии, получаемые Землей от Солнца, в то время как она проходит участки AmB и BnA орбиты, равны между собой.

○ 37-12. Электrolампа накаливания, потребляющая мощность 40 Вт, дает световой поток 380 лм. 40% этого потока направлено на поверхность 5 м². Определить среднюю освещенность поверхности.

△ 37-13. Общий световой поток, излучаемый прямой накаливаемой нитью длиной $l=60$ см, равен $F=132$ лм. Определить наибольшую освещенность плоской поверхности, помещенной параллельно нити на расстоянии $a=5$ см от нее (имеется в виду место, находящееся против середины нити).

○ 37-14. Источник света имеет форму куба, ребро которого равно 10 см. Максимальная сила света равна 90 св. Определить яркость источника.

△ 37-15. Источник света заключен в цилиндр, боковая поверхность которого непрозрачна, а дно прозрачно и рассеивает свет по закону Ламберта. Источник помещен над центром круглого стола, радиус которого $b=70$ см (рис. 37-6). На краю стола лежит книга А. Яркость источника равна $B=8000$ нт, площадь светящей поверхности равна $S=100$ см².

а) На какой высоте h надо поместить источник света, чтобы книга была освещена наиболее сильно? Какова эта освещенность?

б) Какова наибольшая освещенность стены, отстоящей от центра стола на расстоянии $l=1,5$ м?

○ 37-16. Какова светность волоска электрической лампы, если излучаемый световой поток равен 400 лм, длина волоска 60 см и диаметр его 0,04 мм?

○ 37-17. На экран площадью 3 м², рассеивающий свет с коэффициентом отражения 0,8, падает световой поток 150 лм. Каковы: а) светность; б) яркость экрана?

△ 37-18. Светящаяся часть люминесцентной лампы мощностью 15 Вт имеет форму цилиндра длиной 42 см и диаметром 2,24 см. Яркость ее $5 \cdot 10^3$ нт. Определить ее к. п. д.

△ 37-19. Сквозь отверстие в ставне в комнату падает пучок солнечных лучей, образующих зайчик на листе белой бумаги, лежащей на полу. Площадь зайчика 80 см² и освещенность 10 000 лк; коэффициент отражения бумаги равен 0,8. Какова освещенность:

а) потолок комнаты над листом бумаги, если высота комнаты равна 4 м?

б) стены на высоте 2 м от пола? Стена отстоит на 3 м от зайчика и расположена перпендикулярно к плоскости падения луча Солнца на пол.

§ 38. Зеркала, призмы и линзы

1) Формула сферического зеркала

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} = D,$$

где x и y — расстояния точки и ее изображения от вершины зеркала; R — радиус сферы; f — фокусное расстояние; D — оптическая сила.

2) Закон преломления света

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2,$$

здесь i_1 и i_2 — углы падения и преломления, n_1 и n_2 — коэффициенты преломления первой и второй сред для данной длины световой волны. В задачах § 38 (за исключением особо оговоренных случаев) имеются в виду указанные в таблице XXXI средние коэффициенты преломления лучей видимого света.

3) Связь между углом наименьшего отклонения в призме ϵ_m и преломляющим углом призмы ϑ

$$n_1 \sin \frac{\epsilon_m + \vartheta}{2} = n_2 \sin \frac{\vartheta}{2},$$

здесь n_1 и n_2 — коэффициенты преломления среды, окружающей призму, и материала, из которого сделана призма.

4) Отклонение луча в призме с малым преломляющим углом

$$\epsilon = \vartheta \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right).$$

5) При прохождении параксиального пучка лучей света сквозь сферическую поверхность разделяющую среды с коэффициентами преломления n_1 и n_2 , имеет место соотношение

$$n_1 \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{R} \right) = n_2 \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{R} \right),$$

где a_1 и a_2 — расстояние сопряженных точек от сферической поверхности, R — ее радиус. Здесь и далее положительными считаются расстояния, отсчитываемые по направлению распространения света.

Отсюда

$$-\frac{n_1}{a_1} + \frac{n_2}{a_2} = D,$$

где

$$D = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

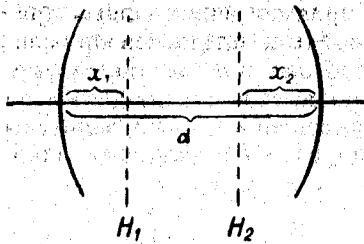


Рис. 38-1.

тей линзы (или от плоских поверхностей) на расстояниях x_1 и x_2 (рис. 38-1)

$$x_1 = -d \frac{n_1 D_2}{n_2 D}; \quad x_2 = +d \frac{n_1 D_1}{n_2 D},$$

где d — толщина линзы; D_1 и D_2 — оптические силы ее поверхностей; D — оптическая сила всей линзы, равная

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_2} D_1 D_2.$$

7) В случае тонкой линзы (толщина линзы d мала) расстояния a_1 и a_2 можно без существенной погрешности отсчитывать от плоскости, проходящей сквозь некоторую среднюю точку линзы. Это не относится к менисковым линзам, у которых при значительных кривизнах их поверхностей погрешность может быть большой. Оптическую силу тонкой линзы можно определять по формуле

$$D = D_1 + D_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

8) Оптическая сила системы двух центрированных линз с оптическими силами D_1 и D_2

$$D = D_1 + D_2 - \Delta \cdot D_1 \cdot D_2 = -\delta D_1 D_2,$$

где Δ — расстояние от второй главной плоскости первой линзы до первой главной плоскости второй линзы; δ — оптический интервал системы (расстояние между вторым фокусом первой линзы и первым фокусом второй линзы; у отрицательных линз первый фокус лежит сзади линзы, а второй — спереди).

9) Светосила объектива

$$C = Dd,$$

где d — диаметр входного отверстия.

10) Увеличение угла зрения визуальными приборами

$$N = \frac{\lg \alpha}{\lg \alpha_0}.$$

есть оптическая сила сферической границы между двумя средами.

6) Формула линзы

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = D.$$

Здесь a_1 и a_2 — расстояния сопряженных точек от главных плоскостей линзы. Главные плоскости H_1 и H_2 отстоят от вершин сферических поверхностей

Здесь α — угол зрения, под которым предмет виден сквозь прибор; α_0 — угол зрения, под которым предмет виден невооруженным глазом (в случае лупы и микроскопа под α_0 подразумевается угол зрения при наблюдении предмета, находящегося на условном расстоянии $L_0 = 25$ см). Приведенные ниже формулы увеличения относятся к случаю, когда глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность.

а) Лупа

$$N = DL_0.$$

б) Микроскоп (D_1 и D_2 — оптические силы объектива и окуляра)

$$N = -L_0 D_1 D_2 \delta.$$

в) Трубы Кеплера и Галилея

$$N = -\frac{D_2}{D_1}.$$

Δ 38-1. Небольшой предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, поставленными под углом $\alpha = 32^\circ$, на расстоянии $r = 10$ см от линии пересечения зеркал ближе к одному из зеркал.

а) На каком расстоянии x друг от друга находятся первые мнимые изображения предмета в зеркалах?

б) Как сместится середина отрезка прямой, соединяющей два изображения предмета, если предмет сдвинуть на $l = 2$ см так, чтобы его расстояние от линии пересечения зеркал осталось неизменным?

Δ 38-2. Луч света падает на одно из зеркал, составляющих двугранный угол 20° , параллельно плоскости, делящей угол пополам, под прямым углом к линии пересечения зеркал. Как он идет дальше? Какова будет сила света по выходе луча из двугранного угла, если начальная сила света равна 10 св и если при каждом отражении сила света уменьшается в два раза?

Δ 38-3. Три плоских зеркала расположены взаимно перпендикулярно. Показать, что луч, упавший под произвольным углом на одно из зеркал и отразившийся на второе, а затем на третье зеркало, после трех отражений идет антипараллельно прежнему направлению.

Δ 38-4. Волосок маленькой электрической лампочки находится на расстоянии 24 см от вершины вогнутого зеркала с фокусным расстоянием 20 см. а) Где надо поставить экран, покрытый белой бумагой, чтобы получить на нем четкое изображение накаливаемого волоска? б) Какова яркость этого изображения при следующих условиях: лампочка дает световой поток 10 лм, на зеркало падает 0,2 этого потока, коэффициент отражения бумаги равен 0,8, волосок имеет длину 2 см и диаметр 0,1 мм?

Δ 38-5. Луч света падает на вогнутое сферическое зеркало с радиусом R параллельно оптической оси OO' на расстоянии a

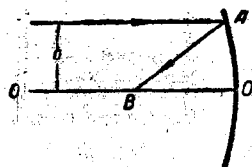


Рис. 38-2.

от нее (рис. 38-2) и после отражения пересекает оптическую ось OO' в точке B . Найти отношение между a и R , при котором относительная ошибка, которую мы делаем, принимая $OB=0,5 R$, равна 1%.

○ 38-6. Вогнутое сферическое зеркало, радиус отверстия которого величина того же порядка, как радиус сферы, дает на экране размытое действительное изображение. Почему же при рассматривании этого изображения в зеркале мы видим его четким (хотя и искаженным)?

○ 38-7. Наблюдатель смотрит сквозь тонкую стеклянную пластинку на свое изображение в выпуклом зеркале и, перемещая пластинку, добивается, что изображения его глаза, видимые в зеркале и в стеклянной пластинке, налагаются друг на друга и не смещаются при покачивании головы (отсутствует параллакс).

На каком расстоянии от глаза наблюдателя помещена пластинка, если фокусное расстояние зеркала равно — 10 см и глаз отдален от его вершины на 40 см?

○ 38-8. На рисунке 38-3, a и b показаны положения оси сферического зеркала MM , светящей точки S и ее изображения S' . Найти построением положения вершины зеркала и его центра для обоих случаев.

○ 38-9. Высота Солнца над горизонтом равна 20° . Пользуясь плоским зеркалом, пускают зайчик в воду в пруде. Как надо расположить зеркало, чтобы отраженный от него луч шел в воде под углом 60° к горизонту?

○ 38-10. Каков предельный угол при падении луча на границу стекло — вода?

△ 38-11. Лучи, исходящие из какой-либо точки предмета, находящегося в воде, проходят сквозь плоскую границу между водой и воздухом.

а) Доказать, что продолжения направлений преломленных лучей в сторону воды не пересекаются в одной точке.

б) Доказать, что продолжения лучей, исходящих из одной точки и прошедших сквозь плоскопараллельную пластинку, тоже не пересекаются в одной точке.

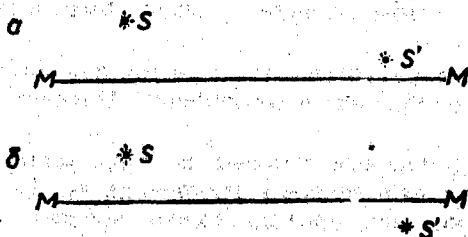


Рис. 38-3.

в) Почему, несмотря на это, мы видим дно водоема или предметы за прозрачной плоскопараллельной пластинкой вполне четко?

△ 38-12. Наблюдатель смотрит на предмет, лежащий на дне водо-

ема. Ему кажется, что предмет находится на глубине $h=1$ м на расстоянии $l=5$ м от его глаз по прямой линии. Глаза наблюдателя находятся на одной и той же высоте, а именно на высоте $H=1,5$ м над поверхностью воды. На какой глубине h_0 лежит предмет?

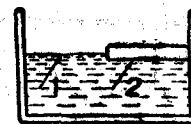


Рис. 38-4.

○ 38-13. Человек смотрит на свое изображение в зеркале, расположенном на дне сосуда, наполненного водой. На какое расстояние аккомодирован глаз человека, если он находится на высоте 10 см над уровнем воды, а зеркало на глубине 8 см под уровнем воды?

○ 38-14. В воде идут два параллельных луча 1 и 2 (рис. 38-4). Луч 1 выходит в воздух непосредственно, а луч 2 проходит сквозь горизонтальную плоскопараллельную стеклянную пластинку.

а) Будут ли лучи 1 и 2 параллельны по выходе в воздух?

б) Выйдет ли в воздух луч 2, если луч 1 испытывает полное отражение?

× △ 38-15. Луч падает на плоскую стеклянную пластинку толщиной 3 см под углом 70° . Определить смещение луча внутри пластинки.

○ 38-16. Луч света проходит сквозь несколько прозрачных плоскопараллельных пластин. При каждом преломлении теряется 0,1 часть силы света; внутри каждой пластины поглощается 0,2 силы света. Какова сила света, прошедшего сквозь 5 пластин, если начальная сила света равна 10 св?

○ 38-17. При рассматривании предметов сквозь призму наибольшая отчетливость получается при наименьшем отклонении лучей. Почему?

○ 38-18. Приставив призму к глазу, мы видим сквозь нее прямые линии, параллельные ребру призмы, в виде дуг. Объяснить явление.

△ 38-19. а) Каков преломляющий угол у стеклянной призмы, если угол наименьшего отклонения равен преломляющему углу?

б) Каков должен быть коэффициент преломления вещества, из которого сделана призма, чтобы условие а) могло быть выполнено?

△ 38-20. Полая стеклянная равноугольная призма находится в воде. Определить угол наибольшего отклонения. Пояснить решение чертежом.

△ 38-21. Имеются две одинаковые призмы с преломляющими углами θ , дающие угол наименьшего отклонения ϵ_0 . Как следует расположить их, чтобы луч, проходя сквозь призмы, в каждой из них отклонился на ϵ_0 ?

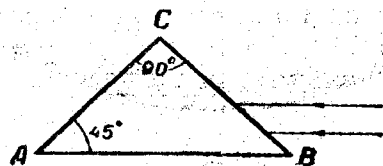


Рис. 38-5.

✕ ○ 38-22. Призма с преломляющим углом 50° дает угол наименьшего отклонения 35° . Какой угол наименьшего отклонения получится, если погрузить эту призму в воду?

△ 38-23. Для получения посредством проекционного аппарата проекций опытов в прямом, а не в перевернутом виде употребляют «оборотную призму», преломляющий угол которой равен 90° .

Начертить, как идут в призме и за ней два луча, падающие на призму параллельно стороне AB (рис. 38-5). Изменяется ли расстояние между лучами? Одинаковы ли длины первого и второго лучей внутри стекла?

△ 38-24. При каких условиях луч, падающий на первую грань стеклянной призмы в плоскости, перпендикулярной к ребру преломляющего угла ϕ , проходит сквозь вторую грань? Рассмотреть случай:

- а) $\phi \geq 2\beta_0$ (β_0 — предельный угол для стекла); б) $\phi = \beta_0$;
в) $\phi < \beta_0$.

Пояснить ответы чертежами.

△ 38-25. Галó, т. е. светлые круги вокруг Солнца (или Луны), видимые в морозные дни, являются результатом преломления света в ледяных кристаллах, взвешенных в воздухе и имеющих форму шестигранных призм. Угловые радиусы кругов 22 и 46° соответствуют углам наименьшего отклонения лучей, идущих от Солнца. Какие грани в ледяных призмах образуют преломляющие углы, соответствующие этим кругам?

△ 38-26. В каких пределах может изменяться угол отклонения, который может дать стеклянная призма с преломляющим углом $\phi = 60^\circ$?

○ 38-27. На тонкостенную сферическую колбу, наполненную жидкостью, падает параллельный пучок лучей света, диаметр сечения которого значительно меньше диаметра колбы. На противоположной стороне колбы пучок

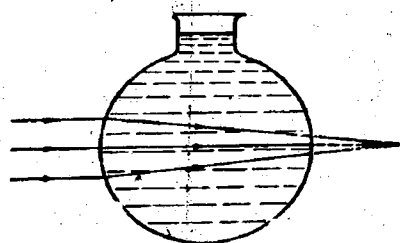


Рис. 38-6.

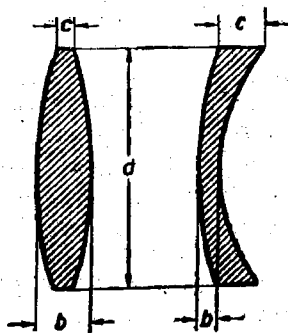


Рис. 38-7.



Рис. 38-8.



Рис. 38-9.

света освещает кружок, диаметр которого в два раза меньше диаметра пучка, падающего на колбу (рис. 38-6). Определить показатель преломления жидкости.

✕ ○ 38-28. Каково фокусное расстояние тонкой двояковыпуклой линзы, сделанной из стекла, если радиусы ее поверхностей одинаковы и равны 13 см ?

✕ △ 38-29. На рисунке 38-7 показаны сечения двух несимметричных стеклянных линз. Определить их оптические силы, если для первой линзы $d_1 = 40\text{ мм}$, $b_1 = 5\text{ мм}$, $c_1 = 3\text{ мм}$, для второй линзы $d_2 = 40\text{ мм}$, $b_2 = 1,5\text{ мм}$, $c_2 = 3\text{ мм}$, принимая их за тонкие.

✕ ○ 38-30. Оптическая сила тонкой стеклянной линзы в воздухе равна $5,5\text{ дптр}$. Какова оптическая сила той же линзы, погруженной в воду?

○ 38-31. Тонкая стеклянная линза имеет оптическую силу $+5\text{ дптр}$. Та же линза, погруженная в жидкость, действует как линза с оптической силой -1 дптр . Определить показатель преломления жидкости.

✕ △ 38-32. Тонкая плоско-вогнутая линза опущена в воду в горизонтальном положении вогнутой поверхностью вниз так, что пространство под ней заполнено воздухом (рис. 38-8). Радиус вогнутой поверхности равен 15 см . Каково фокусное расстояние такой системы?

✕ △ 38-33. Горизонтально расположенное вогнутое зеркало заполнено водой (рис. 38-9). Радиус зеркала 60 см . Каково фокусное расстояние такой системы? Наибольшая глубина воды в зеркале мала по сравнению с радиусом сферы.

○ 38-34. На рисунке 38-10 показаны положения тонкой собирающей линзы LL и ее фокусов F_1 и F_2 . Найти построением ход произвольного луча AB после линзы.

○ 38-35. На рисунке 38-11, a и b показаны положения оптической оси MM тонкой линзы, светящейся точки S и ее изображения S' . Найти построением положения центра линзы и ее фокусов для обоих случаев.

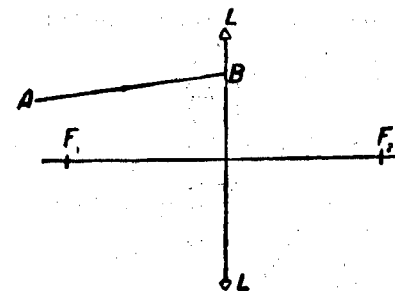


Рис. 38-10.

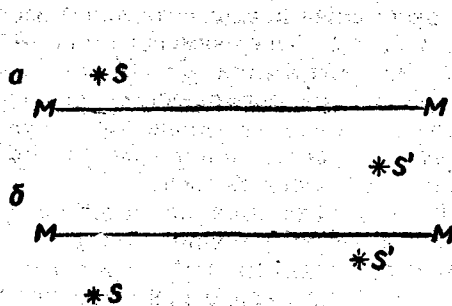


Рис. 38-11.

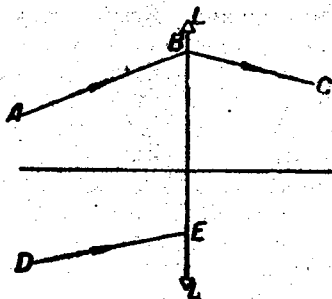


Рис. 38-12.

○ 38-36. На рисунке 38-12 показаны положения оптической оси тонкой линзы LL и ход проходящего сквозь нее луча ABC . Найти построением ход произвольного луча DE за линзой.

□ 38-37. Чтобы найти положение изображения точки S_1 , лежащей на главной оптической оси тонкой собирающей линзы, можно провести следующее построение: из оптического центра линзы O восстановить перпендикуляр к оси и отложить на нем фокусное расстояние линзы $OA=f$ (рис. 38-13). Затем из точки O провести прямую OK под углом 45° к оси. Из точки B пересечения продолжения S_1A и прямой OK опустить перпендикуляр на ось. Его основание есть искомая точка S_2 . Доказать правильность такого построения: а) для точек, лежащих за фокусом; б) для точек, лежащих между фокусом и линзой.

○ 38-38. Диапозитив имеет размер 8×8 см. Определить оптическую силу тонкой собирающей линзы, которая может служить объективом проекционного аппарата, если изображение диапозитива на экране должно иметь размеры $1,2 \times 1,2$ м. Расстояние от объектива до экрана равно 4 м.

○ 38-39. На экране, отстоящем от объектива (тонкая линза оптической силой 5 дптр) на расстоянии 4 м, получено четкое изображение диапозитива. Экран отодвигают на 20 см. На сколько надо переместить диапозитив, чтобы восстановить четкость изображения?

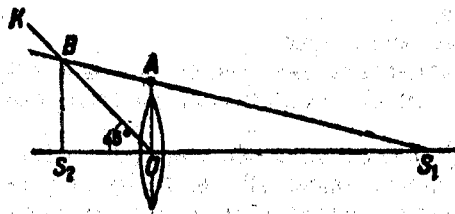


Рис. 38-13.

△ 38-40. Предмет находится на расстоянии 90 см от экрана. Между предметом и экраном перемещают тонкую собирающую линзу, причем при одном положении линзы на экране получается увеличенное изображение, а при другом —

уменьшенное. Каково фокусное расстояние линзы, если линейные размеры первого изображения в 4 раза больше размеров второго?

△ 38-41. Экран находится на расстоянии $d=100$ см от свечи. Помещая между свечой и экраном собирающую тонкую линзу, можно получить изображение свечи на экране при двух положениях линзы, отстоящих на расстоянии $b=20$ см. Во сколько раз отличаются яркости изображений свечи?

○ 38-42. Точечный источник света находится на расстоянии 95 см от экрана. На каком расстоянии от источника света следует поместить линзу с фокусным расстоянием $+16$ см и с диаметром оправы 10 см, чтобы получить на экране ярко освещенный кружок диаметром 2,5 см? Пояснить ответ чертежами.

△ 38-43. Солнечные лучи, падая нормально на экран, дают освещенность 10 000 лк. Перед экраном помещают: а) тонкую линзу оптической силой $+5$ дптр на расстоянии 60 см; б) линзу оптической силы -2 дптр на расстоянии 20 см. Определить в обоих случаях среднюю освещенность экрана в тени от линзы и в светлом кольце вокруг тени. Потерями света в линзе пренебречь.

△ 38-44. Лучи Солнца освещают бумагу. Как изменится освещенность бумаги, если на ней при помощи тонкой линзы с оптической силой 4 дптр и с диаметром отверстия 6 см получить изображение Солнца?

△ 38-45. Фотограф снимает человека в белом платье. Какова освещенность фотопластинки в аппарате в том месте, где находится изображение человека, при следующих условиях: освещенность человека равна 100 лк (открытое место, пасмурный день); коэффициент отражения белой материи равен 0,8; светосила объектива фотоаппарата равна $\frac{1}{4,5}$; потери света в

объективе составляют 10%.

○ 38-46. При каком условии оптическая сила центрированной системы двух тонких линз положительна, при каком отрицательна и при каком равна нулю (т. е. система является телескопической)?

Рассмотреть случаи:

- обе линзы собирающие;
- первая линза собирающая, вторая рассеивающая;
- первая линза рассеивающая, вторая собирающая;
- обе линзы рассеивающие.

Пояснить ответы чертежами хода лучей.

○ 38-47. а) Как следует разместить две тонкие линзы с оптическими силами $+5$ дптр, чтобы оптическая сила системы была равна 8 дптр? б) 5 дптр?

△ 38-48. Расстояние между двумя тонкими линзами, образующими телескопическую систему, равно 12 см, а увеличение равно -5 . Какова будет оптическая сила системы тех же линз, если их сложить вплотную?

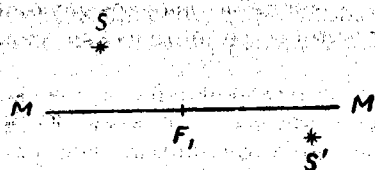


Рис. 38-14.

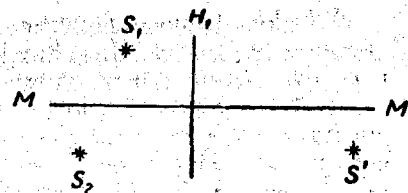


Рис. 38-15.

△ 38-49. Две стеклянные линзы, находясь на некотором расстоянии в воздухе, образуют телескопическую систему.

Как надо изменить расстояние между линзами, чтобы они образовали телескопическую систему, находясь в воде?

△ 38-50. Лучи света проходят сквозь тонкую собирающую линзу ($D = +5$ дптр), отражаются от поставленного сзади нее плоского зеркала и вновь проходят сквозь линзу. Какова оптическая сила такой системы, если отражающая поверхность зеркала отстоит от второй главной плоскости линзы на расстоянии 6 см?

○ 38-51. На рисунке 38-14 показаны оптическая ось MM' и первый фокус F_1 толстой собирающей линзы, а также две сопряженные точки S и S' . Найти построением положения главных плоскостей и второго фокуса линзы.

○ 38-52. На рисунке 38-15 показаны оптическая ось толстой собирающей линзы MM' , первая главная плоскость H_1 и две сопряженные точки S_1 и S' . Построить точку, сопряженную с произвольной точкой S_2 .

○ 38-53. На рисунке 38-16 показаны положения оптической оси MM' толстой линзы, ее первой главной плоскости H_1 и ход некоторого луча до и после линзы. Найти построением фокусы линзы.

△ 38-54. Найти положения главных и фокальных плоскостей стеклянных линз (в воздухе) следующих форм:

а) Передняя поверхность линзы выпуклая ($R_1 = 13$ см), задняя плоская. Толщина линзы 3,5 см.

б) Обе поверхности линзы выпуклые ($R = 13$ см). Толщина линзы 3,5 см.

в) Передняя поверхность линзы выпуклая ($R_1 = 6,5$ см), задняя вогнутая ($R_2 = 13$ см). Толщина линзы 3,5 см.

г) Передняя поверхность линзы вогнутая ($R_1 = 6,5$ см), задняя выпуклая ($R_2 = 13$ см). Толщина линзы 3,5 см.

д) Линза имеет форму шара с радиусом 3,5 см.

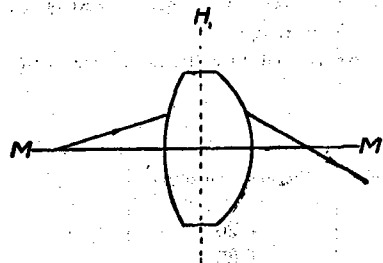


Рис. 38-16.

△ 38-55. Какова должна быть толщина двояковыпуклой стеклянной линзы ($R_1 = R_2 = 5$ см), чтобы ее оптическая сила в воздухе была равна нулю?

△ 38-56. Плоские поверхности плоско-выпуклой и плоско-вогнутой линз склеены тонким слоем прозрачного клея. Коэффициенты преломления стекол, из которых сделаны линзы, равны соответственно 1,6 и 1,5. Радиусы сферических поверхностей и толщины линз одинаковы и равны соответственно 10 и 2,4 см. Определить оптическую силу такой системы в воздухе.

△ 38-57. При помощи линзы, описанной в задаче 38-54, в), получено изображение пламени свечи на экране. Если повернуть линзу так, чтобы вершины выпуклой и вогнутой поверхностей поменялись местами, то для получения четкого изображения линзу придется сдвинуть. На какое расстояние?

△ 38-58. Две одинаковые плоско-выпуклые стеклянные линзы сложены вплотную. Радиусы сферических поверхностей равны 5 см, толщина 2,5 см. Определить оптическую силу системы в воздухе в следующих случаях:

а) плоская поверхность одной линзы приложена к плоской поверхности второй;

б) выпуклая поверхность одной линзы касается выпуклой поверхности другой;

в) выпуклая поверхность одной линзы касается плоской поверхности второй.

△ 38-59. а) Имеются два стеклянных шара диаметрами 10 и 1 см. Как следует расположить эти шары в воздухе, чтобы получилась телескопическая система?

б) Каково увеличение такой системы?

○ 38-60. Начертить примерный ход лучей от некоторой точки предмета до ее изображения на сетчатке глаза, accommodированного на бесконечность и вооруженного: а) лупой; б) микроскопом; в) трубой Кеплера; г) трубой Галилея.

△ 38-61. а) Каково фокусное расстояние 2,5-кратной лупы?

б) Какое увеличение дает эта лупа, если наблюдатель рассматривает сквозь нее свой зрачок, видимый в плоском зеркале? Глаз accommodирован на бесконечность.

△ 38-62. Человек рассматривает свой глаз, пользуясь вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 10 см. Глаз accommodирован на бесконечность. Каково увеличение?

○ 38-63. К микроскопу приложены объективы и окуляры со следующими данными:

Объективы:

№	Фокусное расстояние (мм)	Числовая апертура
1	18	0,20
2	4,3	0,65

Окуляры:

	Фокусное расстояние (мм)
A	36
B	17

а) Если установить тубус микроскопа на механическую длину 16 см, то при объективе № 1 и окуляре A микроскоп дает 56-кратное увеличение, а при объективе № 2 и окуляре B — 600-кратное. Вычислить в обоих случаях оптические интервалы микроскопа. Почему они не равны между собой?

б) Каковы будут увеличения микроскопа при тех же объективах и окулярах, если механическую длину тубуса установить 18 см?

О 38-64. Фокусное расстояние объектива одного из рефракторов в Пулковке равно 14,1 м. Каково увеличение этого рефрактора при пользовании окуляром с фокусным расстоянием 2,5 см?

О 38-65. Каждая трубка театрального бинокля состоит из собирающей линзы (объектив) и рассеивающей линзы (окуляр). Расстояние между линзами, которые можно считать тонкими, при аккомодации глаз на бесконечность, равно 5 см. Диаметр объектива 3,6 см, окуляра 1,2 см. Увеличение бинокля равно 2,5.

а) Что получится, если посмотреть в объектив бинокля, обратив окуляр к объекту?

б) Каковы оптические силы объектива и окуляра?

в) Что более ограничивает пучок лучей, проходящих сквозь бинокль, оправка объектива или окуляра?

О 38-66. На экране получен непрерывный спектр (при помощи щели, освещенной электрической дугой, объектива и призмы). Что будет происходить, если ширину щели постепенно увеличивать?

О 38-67. Что видит наблюдатель, рассматривающий сквозь стеклянную призму черную черту на белой бумаге? Сделать поясняющий чертеж.

О 38-68. При помощи объектива и стеклянной призмы с преломляющим углом 60° на экране получено окрашенное изображение щели (спектр). Какова ширина спектра при таких условиях: лучи падают на призму под углом 49° ; экран находится на расстоянии 3 м от объектива; коэффициент преломления стекла для крайних красного и фиолетового лучей равен 1,505 и 1,525? Шириной щели можно пренебречь.

О 38-69. Коэффициент преломления стекла для крайних красных лучей спектра равен $n_1=1,510$, а для крайних фиолетовых $n_2=1,531$. Определить расстояние между фокусами для красных и фиолетовых лучей двояковыпуклой тонкой линзы с радиусами преломляющих поверхностей по 15 см.

§ 39. Волновая природа света

1) Расстояние x между полосами интерференции на экране, находящемся на расстоянии l от двух когерентных источников света, отстоящих друг от друга на расстоянии d (рис. 39-1), равно

$$x = \frac{\lambda}{2n_1 \sin u_1} = \frac{\lambda}{n_1} \cdot \frac{l}{d \cos u_1}.$$

Здесь $\frac{\lambda}{n_1}$ — длина световой волны в среде, в которой находится экран; u_1 — половина угла между направлениями лучей, образующих в данной точке экрана интерференционную картину; n_1 — коэффициент преломления среды, в которой находится экран. Если $l \gg d$, $\cos u_1 \rightarrow 1$ и формула принимает вид

$$x = \frac{\lambda l}{n_1 d}.$$

2) Принято считать, что протяженный источник света (например, щель, сзади которой находится источник света) дает на экране удобонаблюдаемую интерференционную картину, если интерференционные картины, образуемые крайними точками источника, сдвинуты одна по отношению к другой не более чем на 0,5 расстояния между полосами. На основании этого для наблюдаемости интерференционной картины необходимо соблюдение следующего условия: линейные размеры источника света (например, ширина щели b) должны удовлетворять соотношению

$$b < \frac{\lambda}{4n \sin u}.$$

Здесь u — половина угла между направлениями лучей, исходящих из какой-либо точки источника света и сходящихся в некоторой точке экрана (рис. 39-2); n — коэффициент преломления среды, в которой находится источник света.

3) Число длин волн, укладываю-

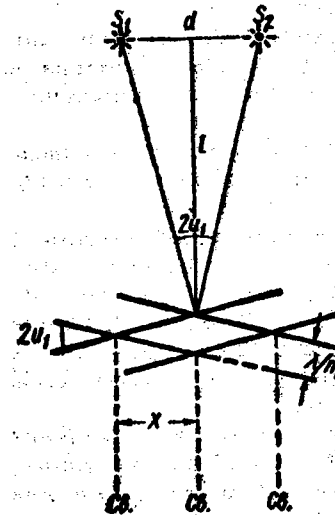


Рис. 39-1.

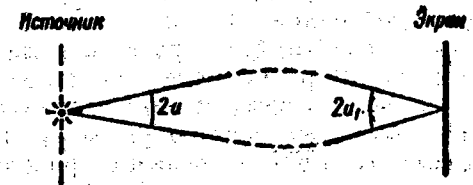


Рис. 39-2.

щихся в разности хода лучей, отраженных от двух поверхностей тонкой пластинки под углом α , по обе стороны которой находятся одинаковые среды, равно

$$\nu = \frac{2d}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{1}{2}.$$

4) Соотношение для углов отклонения φ от нормали для главных максимумов, даваемых дифракционной решеткой при нормальном падении света на решетку, находящуюся в пустоте

$$c \sin \varphi = k\lambda \quad (k = 0; 1; 2; \dots),$$

где k — порядок спектра; c — постоянная решетки. Если лучи падают на решетку под углом α , то имеет место соотношение

$$c (\sin \varphi - \sin \alpha) = k\lambda.$$

5) Закон Брэгга — Вульфа для отражения рентгеновских лучей от кристалла

$$k\lambda = 2d \sin \Theta,$$

где λ — длина волны; k — порядок спектра; d — постоянная кристаллической решетки; Θ — угол между направлением отраженного луча и гранью кристалла.

6) Разрешающая сила дифракционной решетки

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN,$$

где N — общее число штрихов в дифракционной решетке.

7) Разрешающая сила оптического прибора определяется соотношением

$$b > \frac{\lambda}{2n \sin u},$$

здесь b — наименьшее расстояние между двумя штрихами на объекте, различимое при наблюдении посредством прибора; n — показатель преломления среды, заполняющей пространство от объекта до прибора; u — половина угла раскрытия лучей, исходящих из точек объекта и попадающих в прибор.

8) Полная поляризация света, отраженного от диэлектрика, коэффициент преломления которого равен n_2 , в среду, коэффициент преломления которой равен n_1 , имеет место при угле падения Φ , удовлетворяющем соотношению

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{n_1}{n_2}.$$

9) Интенсивность света I , прошедшего сквозь поляризатор и анализатор, плоскости поляризации которых образуют угол α ,

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I_0 — интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор.

10) Угол поворота плоскости поляризации

$$\psi = \alpha d,$$

где α — постоянная вращения, зависящая от природы вещества и длины световых волн; d — длина светового луча в веществе.

Для растворов угол поворота определяется соотношением

$$\psi = [\alpha] dc,$$

где $[\alpha]$ — удельная постоянная вращения; d — длина луча в растворе и c — концентрация активного вещества (число граммов активного вещества в 1 см³ раствора).

О 39-1. Длина волны красного луча в воде равна длине волны зеленого луча в воздухе. Вода освещена красным светом. Какой цвет видит при этом свете человек, открывший глаз под водой?

Δ 39-2. Угол между зеркалами Френеля равен $\alpha = 10'$. На них падает свет от щели, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от линии пересечения зеркал. Длина световых волн равна $\lambda = 0,6$ мкм. Отраженный от зеркал свет дает интерференционную картину на экране, отстоящем на расстоянии $L = 270$ см от линии пересечения зеркал.

а) Каково расстояние между интерференционными полосами на экране?

б) Что случится с интерференционной картиной на экране, если щель сдвинуть на расстояние $s = 2$ мм в таком направлении, что ее расстояние от линии пересечения зеркал не изменится?

в) Что случится с картиной на экране, если расстояние от щели до линии пересечения зеркал увеличить вдвое?

г) Показать справедливость соотношения, указанного в пункте 2) введения, как условия наблюдаемости интерференционной картины, получаемой при помощи зеркал Френеля.

д) Определить наибольшую ширину щели, при которой интерференционная картина еще может наблюдаться.

е) Сколько интерференционных полос можно видеть на экране?

Примечание. Предварительно следует решить задачу 38-1.

Δ 39-3. На рисунке 39-3 изображена схема опыта с бипризмой Френеля. Лучи от источника света S (освещенная щель) проходят сквозь бипризму B и дают на экране KK интерференционную картину. Каков тупой угол δ бипризмы, если при

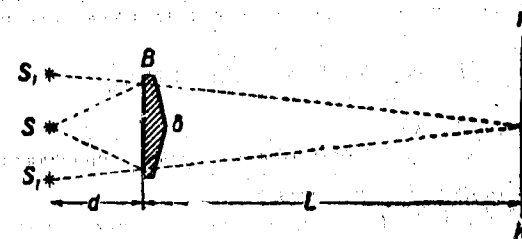


Рис. 39-3.

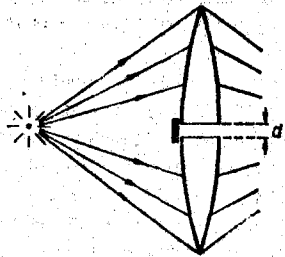


Рис. 39-4.

расстоянии $d=50$ см от щели до бипризмы и при расстоянии $L=450$ см от бипризмы до экрана интерференционные полосы натриевого света ($\lambda=590$ нм) отстоят друг от друга на $x=1,1$ мм? Коэффициент преломления данного сорта стекла (легкий флинт) равен $n=1,578$.

Δ 39-4. Лучи от источника света (накаленная нить) проходят сквозь разрезанную на две половины собирающую линзу (рис. 39-4). При этом на экране получаются интерференционные полосы.

а) Объяснить их происхождение.

б) Определить расстояние между темными полосами интерференции при таких данных: нить находится на расстоянии 20 см от разрезанной линзы; фокусное расстояние линзы 10 см; половинки линзы раздвинуты на расстояние 1 мм; экран находится на расстоянии 450 см от линзы; длина волны 500 нм.

в) Каков должен быть диаметр нити для того, чтобы получилась интерференционная картина?

г) Сколько интерференционных полос видно на экране?

○ 39-5. Какова толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в отраженном свете она представляется зеленой ($\lambda=500$ нм), когда угол между нормалью и лучом зрения равен 35° ? Показатель преломления мыльной воды принять 1,33.

Δ 39-6. На изображении натриевого пламени ($\lambda=589$ нм), наблюдаемом на вертикальной мыльной пленке (рис. 39-5), видны темные горизонтальные полосы. Расстояние между серединами темных полос $l=5$ мм. Коэффициент преломления мыльной воды $n=1,33$. Каков угол между поверхностями пленки?

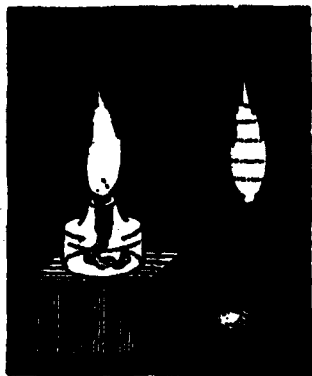


Рис. 39-5.

Δ 39-7. а) Какова максимальная толщина d_m мыльной пленки, при которой наблюдается интерференционная картина, показанная на рисунке 39-5, при следующих условиях: глаз наблюдателя находится на уровне пленки; натриевое пламя ($\lambda=589$ нм) отстоит от наблюдаемого места пленки на расстоянии $a=30$ см; высота пламени $b=3$ см; свет от пламени падает на пленку под углом $\alpha=45^\circ$? б) Почему у свежеполученной пленки интерференционные полосы сперва не видны, а затем появляются в верхней части пленки и постепенно

распространяются вниз? в) Почему при освещении пленки белым светом видны окрашенные в разные цвета светлые полосы и притом только в верхней части пленки?

○ 39-8. На рисунке 39-6 показано расположение линзы и пластинки в опыте по наблюдению колец Ньютона в отраженном свете. Свет может отразиться от следующих поверхностей: от верхней поверхности линзы 1, от выпуклой нижней поверхности линзы 2 и от плоской поверхности темного стекла 3. Почему при расчете явления принимается во внимание возможность интерференции лучей, отразившихся от второй и третьей поверхностей, и не обсуждается возможность интерференции лучей, отразившихся от первой и второй поверхностей?

Δ 39-9. Собирающая линза положена на плоскую стеклянную пластинку, причем вследствие попадания пыли между линзой и пластинкой нет контакта (рис. 39-7). Диаметры 5-го и 15-го темных колец Ньютона, наблюдаемых в отраженном свете ($\lambda=589$ нм), равны 0,7 и 1,7 мм. Определить радиус кривизны поверхности линзы, обращенной к пластинке.

Δ 39-10. Стеклянная симметричная двояковыпуклая линза сложена с такой же двояковогнутой, причем получившаяся система имеет оптическую силу $D=0,25$ дптр. Между линзами в некоторой точке имеется контакт, вокруг которого наблюдается в отраженном свете интерференционная картина.

а) Определить радиус пятого темного кольца ($k=5$), если длина волны $\lambda=0,6$ мкм.

б) Тот же вопрос, если пространство между линзами заполнено водой.

Δ 39-11. Наблюдатель отсчитывает ширину 10 колец Ньютона вдали от их центра. Она оказывается равной 0,7 мм. Ширина следующих 10 колец оказывается равной 0,4 мм. Наблюдение производится в отраженном свете при длине волны 589 нм. Определить радиус кривизны поверхности линзы.

○ 39-12. а) Какова будет форма полос интерференции, если цилиндрическую собирающую линзу положить на плоскую стеклянную пластинку?

б) Какова будет форма полос интерференции, если сложить две цилиндрические собирающие линзы так, чтобы их образующие составляли прямой угол?

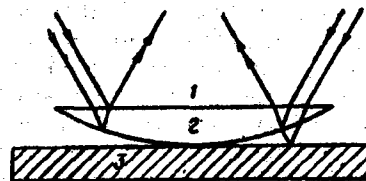


Рис. 39-6.

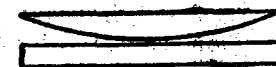


Рис. 39-7.

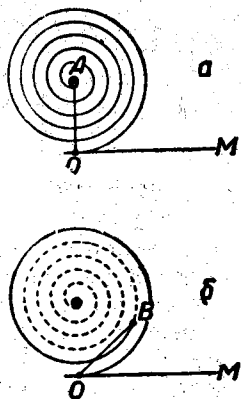


Рис. 39-8.

○ 39-13. Спектр натрия состоит из двух линий с длинами волн 589,00 и 589,59 нм. Какое по счету темное кольцо Ньютона, соответствующее одной из этих линий, совпадает со следующим по счету темным кольцом, соответствующим другой линии? Наблюдение производится в отраженном свете.

○ 39-14. На рисунке 39-8, а показана диаграмма амплитуды колебания, дошедшего до некоторой точки К от светящей точки S. Каждая половина витка спирали соответствует одной зоне Френеля. Направление прямой OM показывает фазу колебания, дошедшего от светящей точки до точки К по прямой. Отрезок OA показывает амплитуду колебания, дошедшего до точки К при полном отсутствии препятствий между S и K. На рисунке 39-8, б показана диаграмма, соответствующая случаю, когда между источником света и точкой К помещена ширма с отверстием, диаметр которого соответствует 2,4 первых зон Френеля. Сплошная часть спирали соответствует зонам, видимым сквозь отверстие, а пунктирная — закрытым. OB — амплитуда колебаний в точке К.

а) Начертить подобные диаграммы для случаев, когда ширма закрывает все зоны Френеля, кроме: 1) первой зоны Френеля; 2) двух первых зон; 3) трех с половиной первых зон. (Спираль следует воспроизводить приближенно.)

б) Показать, что при отсутствии препятствий интенсивность света (освещенность) в точке К приблизительно в 4 раза меньше интенсивности света, прошедшего сквозь отверстие, пропускающее только первую зону Френеля.

в) Показать, что интенсивность света, прошедшего сквозь отверстие, пропускающее только половину первой зоны, приблизительно в два раза больше интенсивности при полном отсутствии препятствий.

г) Начертить диаграмму, соответствующую случаю, когда первые 1,5 зоны закрыты круглым диском.

д) Начертить диаграмму, соответствующую случаю, когда свет проходит сквозь кольцевое отверстие, открывающее третью и четвертую зоны.

е) Начертить диаграмму, соответствующую случаю, когда третья и четвертая зоны закрыты непрозрачным кольцом.

△ 39-15. Точечный источник света S, излучающий свет с длиной волны $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ освещает экран, расположенный на расстоянии $l = 11 \text{ м}$ от S. Между источником света S и экраном на расстоянии $a = 5 \text{ м}$ от экрана помещена ширма с круглым отверстием, диаметр которого $d = 4,2 \text{ мм}$. Является ли

освещенность в центре получающейся на экране дифракционной картины большей или меньшей, чем та, которая будет иметь место, если ширму убрать?

○ 39-16. Какова роль линзы в опытах с дифракционной решеткой?

△ 39-17. Лучи света падают нормально на ту сторону стеклянной дифракционной решетки, где нанесены штрихи, а с другой стороны решетки производится наблюдение получающегося спектра и измерение длин волн. Лучи дифрагируют в стекле, проходят сквозь стеклянную пластинку и выходят в воздух. Следует ли отсюда, что измеряются длины волн в стекле?

△ 39-18. Одна сторона плоскопараллельной прозрачной пластинки гладкая, а на другой имеются цилиндрические канавки одинаковой ширины (порядка 0,01 мм), вплотную прилегающие друг к другу, так что плоская поверхность отсутствует (рис. 39-9).

а) Как действует такая пластинка на свет, нормально падающий на ее поверхность?

б) Как изменится действие пластинки на свет, если ее поместить в жидкость с таким же коэффициентом преломления, как и вещество пластинки?

○ 39-19. На дифракционную решетку нормально падает свет от натриевого пламени ($\lambda = 589 \text{ нм}$). При этом для спектра третьего порядка получается угол отклонений $10^\circ 11'$. Какова длина волны, для которой угол отклонения во втором порядке равен $6^\circ 16'$?

○ 39-20. а) На дифракционную решетку, имеющую 50 штрихов на 1 мм, падает нормально параллельный пучок белого света. Какова разность углов отклонения конца первого и начала второго спектров? Длины крайних красных и крайних фиолетовых волн принять равными 760 и 400 нм.

б) Какова разность углов отклонения конца второго и начала третьего спектров?

△ 39-21. На решетку с постоянной 0,006 мм нормально падает монохроматический свет. Угол между спектрами 1-го и 2-го порядков равен $4^\circ 36'$. Определить длину световой волны.

○ 39-22. Определить наибольший порядок спектра, который может образовать дифракционная решетка, имеющая 500 штрихов на 1 мм, если длина волны равна 590 нм. Рассмотреть два случая: а) свет падает на решетку нормально; б) свет падает под углом 30° .

△ 39-23. Если смотреть сквозь дифракционную решетку на отдаленную лампочку, то видна дифракционная картина. Дать объяснения всем явлениям, которые будут наблюдаться, если, оставляя решетку перед глазом: а) вращать ее вокруг оси, проходящей сквозь ее середину и перпендикулярной к плоскости

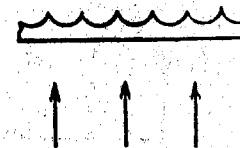


Рис. 39-9

решетки; б) двигать решетку поступательно перпендикулярно к прямой, направленной от лампочки к глазу, и вдоль этой прямой; в) вращать решетку вокруг оси, совпадающей с плоскостью решетки и параллельной ее штрихам; г) вращать решетку вокруг оси, совпадающей с плоскостью решетки и перпендикулярной ее штрихам.

Δ 39-24. Две среды с показателями преломления n_1 и n_2 граничат по плоской поверхности, на которой нанесены штрихи, образующие дифракционную решетку с постоянной s . Показать, что при длине волны, удовлетворяющей соотношению

$$\lambda > (n_1 + n_2)s,$$

лучи света проходят сквозь такую заштрихованную поверхность так же, как и сквозь гладкую.

□ 39-25. Прозрачная пластинка покрыта с обеих сторон штрихами, образующими дифракционные решетки. На пластинку нормально падает монохроматический свет. Чем отличается действие на свет такой пластинки по сравнению со стеклянной пластинкой такой же толщины, покрытой штрихами только с одной стороны? Рассмотреть два случая:

а) толщина пластинки значительно больше постоянной решетки;

б) толщина пластинки равна постоянной решетки.

Δ 39-26. Рентгеновские лучи от палладиевого антикатада падают на грань (100) кристалла хлористого натрия и отражаются под углом $5,9^\circ$.

а) Определить длину падающей волны, зная, что решетка хлористого натрия имеет вид, показанный на рисунке 39-10, на котором белые кружки соответствуют положениям центров ионов натрия, а черные — хлора. Грань (100) параллельна плоскости YZ .

б) Под каким углом должно происходить отражение первого порядка для грани (110)? (Эта грань параллельна оси Z и отсекает от осей X и Y равные отрезки.)

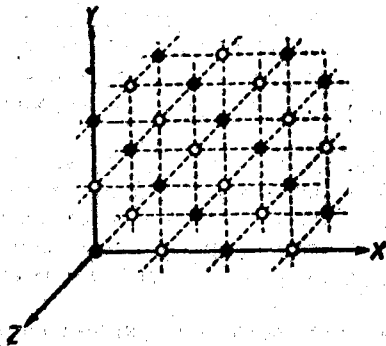


Рис. 39-10.

○ 39-27. Какова должна быть длина дифракционной решетки, имеющей 50 штрихов на 1 мм, чтобы в спектре второго порядка можно было разделить различить две линии натрия 5800 Å и 5896 Å?

○ 39-28. Диаметр зрачка человеческого глаза может меняться от 2 до 8 мм. Чем объяснить, что максимальная острота зрения имеет место при диаметре зрачка 3—4 мм?

○ 39-29. Средний человеческий глаз может видеть на расстоянии 10 м раздельно два параллельных штриха на белой бумаге, отстоящих друг от друга на 3 мм. При остром зрении расстояние между раздельно видимыми штрихами уменьшается до 2 мм. Соответствуют ли эти данные разрешающей способности глаза, вычисленной по формуле пункта 7 введения?

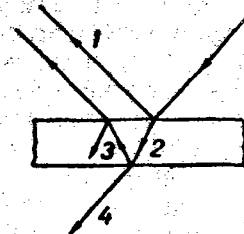


Рис. 39-11.

Принять для расчета диаметр зрачка равным 3 мм, длину световых волн 6000 Å.

○ 39-30. Предположим, что диаметр зрачка при наблюдении в призматический бинокль с 8-кратным увеличением равен 5 мм. Каков должен быть диаметр оправы объектива, чтобы увеличение разрешающей силы, получающейся при пользовании биноклем, по сравнению с невооруженным глазом было тоже 8-кратным?

○ 39-31. Определить коэффициент преломления в следующих случаях:

а) Для непрозрачной эмали угол полной поляризации при отражении оказался равным 58° .

б) Для прозрачного вещества угол полной поляризации (при падении света извне) оказался равным предельному углу (наименьшему углу, при котором получается полное отражение).

Δ 39-32. Найти угол полной поляризации при отражении от границы стекло — вода.

Δ 39-33. Каков должен быть преломляющий угол у стеклянной призмы, чтобы углы входа и выхода луча из призмы были углами полной поляризации? Каков при таком преломляющем угле угол наименьшего отклонения?

Δ 39-34. Естественный луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку. Угол падения равен углу полной поляризации. При таком угле падения на стекло интенсивность отраженного луча составляет около 0,1 от интенсивности падающего естественного света. Определить интенсивность естественного и поляризованного света в лучах, помеченных цифрами на рисунке 39-11, приняв интенсивность падающего луча за единицу. Поглощением света в пластинке пренебречь.

○ 39-35. Пусть поглощение света в николе таково, что наибольшая сила поляризованного света, прошедшего сквозь николь, равна 90% поляризованного света, падающего на него.

а) Во сколько раз уменьшается сила естественного света при прохождении света сквозь два николя, плоскости поляризации которых составляют угол 63° ?

б) Во сколько раз уменьшается сила света, если, кроме двух николей, упомянутых в условии а), свет проходит еще сквозь

один николю, направление плоскости поляризации которого совпадает с первым николем?

□ 39-36. а) Две стопы стеклянных пластинок, используемые как поляризаторы, при параллельных плоскостях поляризации пропускают в $n=16$ раз больше света, чем при скрещенных плоскостях. Определить степень поляризации p (отношение интенсивности поляризованного света к общей интенсивности прошедшего света), которую создает каждая стопа в отдельности.

б) Какова будет степень поляризации p , если число стеклянных пластинок в каждой стопе удвоить?

○ 39-37. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны 509 нм равен 180° . Постоянная вращения в кварце для этой длины волны равна $29,7 \text{ град} \cdot \text{мм}^{-1}$.

△ 39-38. Монохроматический свет ($\lambda=4047 \text{ Å}$) проходит сквозь поляриод P (рис. 39-12) и падает на кварцевую пластинку K , имеющую форму клина, угол между гранями которого равен $\Theta=7^\circ 48'$. Направление оптической оси в кварце показано штриховкой. Лучи света проходят в кварце пути порядка нескольких миллиметров. Постоянная вращения для указанной длины волны в кварце равна $48,9 \text{ град} \cdot \text{мм}^{-1}$. Какая картина видна наблюдателю, который смотрит сквозь второй поляриод A ?

△ 39-39. На рисунке 39-13 показана схема демонстрационного опыта выдающегося русского физика Н. А. Умова. Свет от источника S проходит сквозь поляризатор (поляриод) P , а затем идет сверху вниз сквозь слегка замутненный раствор сахара в стеклянном сосуде B . В сосуде видна темная винтообразно расположенная полоса.

а) Объяснить явление.

б) Какова длина шага темного винта в растворе при следующих условиях: раствор содержит 650 г сахара на 1 л воды; плотность раствора $1,32 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; освещение

раствора производится светом с длиной волны 521 нм , для которого постоянная вращения равна $87 \text{ град} \cdot \text{дм}^{-1}$?

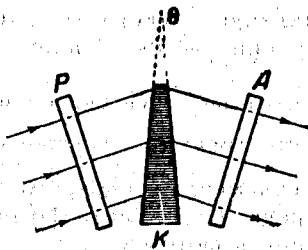


Рис. 39-12.



Рис. 39-13.

§ 40. Квантовые явления в оптике

1) Энергия фотона

$$\epsilon = h\nu,$$

где h — постоянная Планка; ν — частота.

2) Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \phi,$$

где ϕ — работа выхода электрона из тела; m и v — масса и скорость вылетевшего электрона.

3) Световое давление (при зеркальном отражении и нормальном падении)

$$p = \frac{I}{c}(1+r),$$

где I — интенсивность света; r — коэффициент зеркального отражения; c — скорость света.

4) Движению частицы со скоростью v соответствует волновой процесс, причем длина волны

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

где m — масса частицы.

○ 40-1. Определить энергию одного фотона: а) для красного света ($\lambda=600 \text{ нм}$); б) для жестких рентгеновских лучей ($\lambda=1 \text{ Å}$).

При какой температуре средняя энергия теплового движения (на одну степень свободы) молекул равна энергии указанных фотонов?

○ 40-2. Лампочка карманного фонаря потребляет мощность около 1 Вт . Приняв, что эта мощность рассеивается во всех направлениях в виде излучения и что длина волны, соответствующая средней частоте, равна 1 мкм , определить число фотонов, падающих на 1 см^2 площадки, поставленной перпендикулярно к лучам на расстоянии 10 км , в течение 1 сек .

○ 40-3. Определить наибольшую длину световой волны, при которой может иметь место фотоэффект: а) для платины, б) для цезия.

○ 40-4. Определить максимальную скорость электрона, вылетевшего из цезия при освещении светом с длиной волны 400 нм .

△ 40-5. Селеновый фотоэлемент имеет чувствительность по току, равную $200 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$. Принимая, что такая же чувствительность имеет место при освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 5510 Å , определить, сколько фотонов приходится на 1 электрон, участвующий в фототоке.

Указание. Принять во внимание пункт 4 введения к § 37.

○ 40-6. Наименьшая длина рентгеновских лучей, получаемых при посредстве трубки, работающей под напряжением U , вычисляется по формуле: $\lambda_0 = \frac{A}{U}$, где A — постоянная, зависящая от выбора единиц. Определить величину A при условии, что λ выражена в ангстремах, а U — в киловольтах.

△ 40-7. Излучение рентгеновской трубки падает на кристалл кальцита (CaCO_3). Наименьший угол между плоскостью кристалла и пучком рентгеновских лучей, при котором можно отметить отражение, равен $2^\circ 36'$. Постоянная решетки кальцита равна $3,04 \cdot 10^{-8}$ см. Под каким напряжением работает рентгеновская трубка?

△ 40-8. а) Определить давление лучей Солнца на поверхность черного тела, помещенного на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля. Угол падения равен нулю. Солнечная постоянная (интенсивность солнечной радиации за пределами атмосферы) равна $1,35 \cdot 10^3 \frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$.

б) Произвести тот же расчет для тела, отражающего все лучи.

в) Произвести тот же расчет для стеклянной пластинки, отражающей 4% всех лучей и поглощающей 6% их энергии.

△ 40-9. Часть стенки колбы электролампы накаливания, представляющей собой сферу радиусом 4 см, посеребрена. Лампа потребляет мощность 50 Вт, из которых 90% затрачивается на излучение. Что больше: давление газа в колбе (10^{-8} мм рт. ст.) или световое давление на стенки?

△ 40-10. Свет падает на плоскую пластинку под углом $\alpha \neq 0$. В каком направлении будет отталкиваться пластинка: а) если ее поверхность поглощает весь свет? б) если поверхность зеркально отражает свет?

□ 40-11. В вакууме подвешена плоская металлическая пластинка, с одной стороны блестящая ($r=1$), с другой зачерненная ($r=0$). Ее освещают нормально падающим сильным светом. Найти отношение сил, на нее действующих, при освещении блестящей и черной ее сторон.

△ 40-12. Предположим, что находящаяся в вакууме пылинка под давлением световых лучей движется с ускорением. За счет чего увеличивается ее кинетическая энергия? Рассмотреть случаи: а) пылинка отражает все лучи; б) пылинка поглощает все лучи.

○ 40-13. Определить длины волн для волновых процессов, соответствующих:

а) движению альфа-частицы со скоростью $5000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$;

б) движению молекул кислорода при температуре 27°C (при средней скорости).

○ 40-14. Электроны, падающие на алюминиевую фольгу, дают дифракционную картину, причем угловое отклонение

спектра первого порядка равно $1,1^\circ$. Постоянная решетки алюминия равна $4,05 \text{ \AA}$. Какова скорость электронов?

○ 40-15. В электронном микроскопе электроны ускоряются разностью потенциалов 90 кВ. Какова может быть апертура микроскопа, если требуется рассмотреть объект, детали которого имеют размеры около 1 нм?

△ 40-16. В 1913 г. Н. Бор предложил модель атома водорода, сыгравшую роль первого наброска современной теории строения атомов. По этой модели атом водорода состоит из положительно заряженного ядра (протон), вокруг которого обращается по окружности электрон. Устойчивым является движение электрона лишь по тем орбитам, для которых момент количества движения равен или кратен постоянной Планка, деленной на 2π :

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где $n=1; 2; 3$ и т. д.; m — масса электрона; v — скорость его; r — радиус орбиты. Каждой орбите соответствует определенный уровень энергии атома, так что при поглощении атомом энергии или при испускании ее электрон переходит с одной орбиты на другую.

а) Показать, что приведенное выше условие устойчивости движения электрона равносильно требованию, чтобы на орбите электрона укладывалось целое число стоячих волн, длины которых соответствуют движению электрона.

б) Найти радиус орбиты электрона, соответствующий наименьшему уровню энергии атома водорода.

в) Определить работу ионизации атома водорода, т. е. полного удаления электрона с первой орбиты.

г) Определить длину волны спектра испускания атомного водорода λ_n , излучаемой при переходе электрона с орбиты с номером $n=4$ на орбиту с номером $n=2$. Каково изменение скорости атома водорода?

д) Определить длину волны спектра испускания ионизованного гелия, соответствующего переходу электрона с орбиты с номером $n=4$ на орбиту с номером $n=2$.

§ 41. Законы излучения

1) Тело, поглощающее падающий на него поток электромагнитных волн полностью, называется абсолютно черным телом или полным излучателем. Коэффициент поглощения абсолютно черного тела равен единице для волн всех частот ($A=1$). Тела, поглощающие падающие на них потоки волн частично ($A<1$), называются «нечерными». У нечерных тел коэффициент A зависит от частоты. Воображаемые тела, у которых коэффициент A для всех частот имеет одно и то же значение, называются «серыми».

2) Стенки замкнутой полости внутри любого тела являются абсолютно черными (полным излучателем), если температура их всюду одна и та же. Любое тело той же температуры внутри полости тоже является полным излучателем. Свойства стенок незамкнутой полости тем ближе к свойствам полного излучателя, чем меньше площадь отверстия по сравнению с общей площадью стенок полости.

3) Мощность излучения с единицы площади нечерного тела в интервале частот от ν до $\nu + \Delta\nu$ равна

$$\Delta J_\nu = A \Delta J_\nu,$$

где A — коэффициент поглощения в том же интервале частот, ΔJ_ν — мощность излучения с единицы площади полного излучателя в том же интервале (закон Кирхгофа).

4) Суммарная мощность излучения с единицы площади полного излучателя, имеющего температуру T (закон Стефана),

$$J = \sigma T^4.$$

5) Суммарная мощность излучения с единицы площади нечерного тела

$$J = \epsilon \sigma T^4,$$

где ϵ — коэффициент полного излучения данного тела, равный, согласно закону Кирхгофа, коэффициенту суммарного поглощения тела и зависящий от природы тела и его температуры. У серых тел ϵ не зависит от температуры.

6) Формула Планка для функции распределения мощности полного излучателя по интервалам частот

$$E(\nu) = \frac{\Delta J_\nu}{\Delta \nu} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

7) Связь между температурой полного излучателя и длиной волны, соответствующей максимуму функции распределения мощности полного излучателя по интервалам длин волн,

$$\lambda_0 T = C,$$

где C — постоянная величина.

8) При решении задач об излучении вольфрама следует использовать сведения о вольфраме, приведенные в таблице XXIX.

О 41-1. Мощность излучения с поверхности Земли в космос принимается равной $91 \frac{\text{дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

а) Какова температура абсолютно черного тела (полного излучателя), имеющего ту же мощность излучения?

б) Каков коэффициент полного излучения тела, если при

температуре 15°C (средняя температура поверхности Земли) оно имеет ту же мощность излучения?

О 41-2. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током 1 а до температуры 1000°K . При каком токе нить накалится до 3000°K ? При расчете пренебречь потерями энергии вследствие теплопроводности подвесов нити и обратным излучением окружающих тел.

О 41-3. Вольфрамовая нить диаметром $0,1 \text{ мм}$ соединена последовательно с другой вольфрамовой нитью. Нити накаляются в вакууме током, причем первая нить имеет температуру 2000°K , а вторая — 3000°K . Каков диаметр второй нити?

Δ 41-4. Температура волоска электрической лампы, питаемой переменным током, колеблется. Разница между наибольшей и наименьшей температурами накала вольфрамового волоска электрической лампы (15 вт , 120 в) при переменном токе (50 гц) оценивается в 80° . Во сколько раз изменяется общая мощность излучения вследствие колебания температуры, если среднее ее значение равно 2300°K ? Принять, что вольфрам излучает, как серое тело.

Δ 41-5. При работе радиоламп происходит разогревание анода вследствие бомбардировки его электронами. Рассеяние энергии производится в основном в виде излучения, рассеяние посредством теплопроводности подводящих частей незначительно. Определить допустимую силу анодного тока в лампе, работающей под напряжением 400 в . Анод сделан из никеля; он имеет форму цилиндра длиной 4 см и диаметром 1 см . Принять, что энергия рассеивается только с наружной поверхности цилиндра и что нагревание анода до 1000°K является допустимым. При этой температуре коэффициент полного излучения никеля равен $0,2$.

□ 41-6. Вольфрамовый волосок находится в вакууме. Диаметр волоска $0,1 \text{ мм}$. Волосок накален до 2500°K . а) На сколько температура волоска на его оси отличается от температуры его поверхности, если теплопроводность вольфрама при 2500°K равна $148 \frac{\text{дж}}{\text{м} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$?

б) Какой ток идет по волоску?

Δ 41-7. Интенсивность солнечной радиации вблизи Земли за пределами ее атмосферы (солнечная постоянная) равна $J = 1,35 \cdot 10^3 \frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$. Принимая, что Солнце излучает, как абсолютно черное тело, определить температуру его излучающей поверхности.

Δ 41-8. Определить диаметр сферической космической частицы, если действующие на нее силы светового давления и притяжения к Солнцу взаимно уравновешиваются. Частица состоит из железа. Температуру Солнца принять равной $T_0 = 6000^\circ \text{K}$.

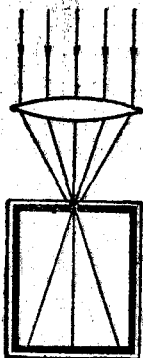


Рис. 41-1.

Δ 41-9. Вокруг сплошного, проводящего теплоу шара расположен другой, полый; коэффициент поглощения наружной поверхности второго шара равен нулю. Если температуры обоих шаров одинаковы, то второй излучает энергии больше, чем первый, так как излучающая поверхность больше. Как это примирить со вторым принципом термодинамики?

О 41-10. Муфельная печь потребляет мощность 0,5 кВт. Температура ее внутренней поверхности при открытом отверстии диаметром 5 см равна 700° С. Какая часть потребляемой мощности рассеивается стенками?

О 41-11. Согласно положению о световых единицах 1 лм есть световой поток, излучаемый абсолютно черным телом с площади 0,5305 мм² при температуре затвердевающей платины (2042° К). Какая доля энергии этого излучателя приходится на видимую область спектра?

О 41-12. Вольфрамовая нить диаметром 0,1 мм натянута в вакууме по оси трубки, длина которой во много раз больше ее диаметра. Температура трубки поддерживается равной 700° К. По нити идет ток, вследствие чего ее температура на 300° К выше температуры трубки. Определить ток.

При расчете принять, что интегральный коэффициент поглощения вольфрамом обратного излучения трубки равен коэффициенту полного излучения вольфрама при той же температуре.

Δ 41-13. Колосниковая решетка площадью 2 м² окружена железными стенками. Температура угля на колосниковой решетке равна 1300° К, температура стенок 600° К. Коэффициенты поглощения угля и окисленного железа можно считать равным 0,9. Вычислить количество теплоты, передаваемое лучами от решетки к стенкам за 1 ч.

□ 41-14. Лучи Солнца собираются посредством линзы со светосилой $\frac{d}{f} = 0,5$ на маленькое отверстие полости, стенки которой изнутри зачернены, а снаружи блестящие (рис. 41-1). Диаметр отверстия меньше диаметра изображения Солнца. Пренебрегая потерями энергии при прохождении лучей Солнца сквозь атмосферу и линзу, а также количеством тепла, проходящим сквозь стенки полости, определить температуру T внутри полости. Температуру поверхности Солнца принять равной $T_c = 6000^\circ \text{ К}$.

□ 41-15. Внутри солнечной системы на таком же расстоянии R от Солнца, как и Земля, находится частица сферической формы. Принимая, что Солнце излучает, как абсолютно черное тело с температурой $T_c = 6000^\circ \text{ К}$, и что температура частицы T

во всех ее точках одинакова, определить ее температуру, исходя из следующих предположений:

а) частица обладает свойствами серого тела;

б) частица поглощает и излучает только лучи с длиной волны, близкой к $\lambda = 5000 \text{ Å}$;

в) частица поглощает и излучает только лучи с длиной волны, близкой к $\lambda = 5 \text{ мкм}$.

Δ 41-16. Проходя афелий, Земля находится на 3,3% дальше от Солнца, чем когда она проходит перигелий. Принимая Землю за серое тело со средней температурой 288° К, определить разность температур, которые Земля имеет в афелии и перигелии.

Δ 41-17. В электрической лампе вольфрамовый волосок диаметром $d = 0,05 \text{ мм}$ накаливается при работе лампы до $T_1 = 2700^\circ \text{ К}$. Через сколько времени после выключения тока температура волоска упадет до $T_2 = 600^\circ \text{ К}$? При расчете принять, что волосок излучает, как серое тело, с коэффициентом поглощения $A = 0,3$. Пренебречь всеми другими причинами потери теплоты и обратным излучением стенок лампы.

□ 41-18. В каком случае электрокалильная лампа дает больше света: когда она работает на постоянном токе или на переменном, эффективное напряжение которого равно напряжению постоянного тока?

О 41-19. Как изменилось бы общее количество энергии, излучаемой Солнцем, если бы одна часть его поверхности немного охладилась, а другая на столько же нагрелась?

Δ 41-20. Написать формулы, выражающие функции распределения излучения абсолютно черного тела: а) по интервалам длин волн; б) по интервалам логарифмов частот; в) по интервалам логарифмов длин. Показать, что при заданной температуре максимумы функций распределения по интервалам частот и по интервалам длин волн соответствуют разным длинам волн, а максимумы функций распределения по интервалам логарифмов этих величин соответствуют одинаковым длинам волн.

Δ 41-21. Определить длину волн, соответствующих максимумам функции распределения по интервалам длин волн в следующих случаях: а) волосок софитной лампы (рис. 41-2) имеет длину $l = 15 \text{ см}$ и диаметр $d = 0,03 \text{ мм}$. Потребляемая мощность $P = 10 \text{ Вт}$, из нее около $P_1 = 2 \text{ Вт}$ рассеивается вследствие теплопроводности. Принять, что волосок излучает, как серое тело, с коэффициентом поглощения $A = 0,3$. б) Указанная лампа помещается в металлический цилиндр, с поверхности которого, равной 150 см^2 , рассеивается указанная выше мощность. Принять, что потери на теплопроводность и коэффициент поглощения не изменились.

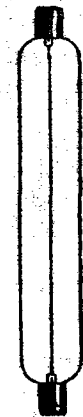


Рис. 41-2.

Δ 41-22. На экране получен спектр от положительного катодного вольтовой дуги, имеющего температуру 4000° К. Определить отношение χ между мощностями излучения, падающими на участки экрана, соответствующие длинам волн от 695 до 705 нм (участок красного цвета) и от 395 до 405 нм (участок фиолетового цвета). Принять, что катод излучает, как черное тело. Поглощение в стекле и в воздухе одинаково для красных и фиолетовых лучей.

□ 41-23. В длинной ($L=100$ м) вращающейся печи диаметром $D=1$ м поддерживается температура 1200° К на холодном конце трубы и 1300° К на горячем. Определить поток тепла вдоль оси, обусловленный лучистым теплообменом. Стенки считать «черными». Допустимо ограничиться приближенной оценкой ($\pm 50\%$ точности).

§ 42. Внутрядерные явления и теория относительности

1) Число радиоактивных атомов, распадающихся за промежуток времени Δt , пропорционально числу наличных атомов n и промежутку времени

$$\Delta n = -\lambda n \Delta t = -\frac{\ln 2}{T} n \Delta t,$$

где λ — постоянная распада; T — период полураспада.

2) Если количества материнского и дочернего радиоактивных веществ с течением времени не меняются (установилось радиоактивное равновесие), то имеет место соотношение

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2.$$

3) Единица активности радиоактивных веществ — кюри. Кюри есть активность такого радиоактивного препарата, в котором за 1 сек происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ актов распада.

4) Изменение энергии W , соответствующее изменению массы на величину m ,

$$W = mc^2,$$

где c — скорость света.

○ 42-1. Вследствие радиоактивного распада ${}_{92}\text{U}^{238}$ превращается в ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. Сколько α -превращений и β -превращений он при этом испытывает?

○ 42-2. За какой промежуток времени из 10^7 атомов актиния распадается один атом?

Δ 42-3. Определить среднюю продолжительность τ жизни атома радия А.

Δ 42-4. Крупинка, содержащая радий, находится на расстоянии 1,2 см от флуоресцирующего экрана. Какое количество радия имеется в ней, если в течение минуты на площади экрана, равной $0,02$ см², видно 47 сцинтилляций? Продукты распада ра-

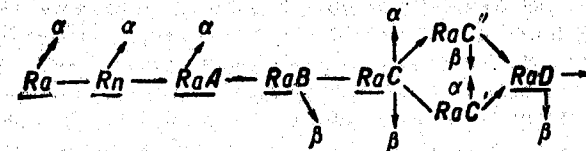


Рис. 42-1.

дия очень быстро отсасываются насосом. Принять, что все выбрасываемые при распаде атомов радия α -частицы вылетают из крупинки.

Δ 42-5. Натрий ${}_{11}\text{Na}^{23}$, облучаемый дейтонами, превращается в радиоактивный изотоп натрия ${}_{11}\text{Na}^{24}$ с периодом полураспада 15,5 ч. Какая доля первоначального количества радиоактивного натрия останется через сутки, если прекратить облучение дейтонами?

○ 42-6. Определить отношение количества радия к количеству урана в древних минералах.

Δ 42-7. На рисунке 42-1 показана схема превращения Ra в RaD. Сколько α -частиц испускает за 1 сек смесь 1 мг радия со всеми продуктами распада, указанными на схеме, если установилось радиоактивное равновесие?

Δ 42-8. Определить объем 1 кюри радона при нормальных условиях.

Δ 42-9. Измерения показывают, что ионизационный ток насыщения в присутствии 1 мки радона в воздухе равен 0,92 мкА. Сколько ионов производит в воздухе каждая α -частица, выбрасываемая радонном?

○ 42-10. Определить энергию, соответствующую массе покоящегося электрона (собственная энергия электрона).

○ 42-11. Определить энергию связи (разность энергии сложной частицы и энергий составляющих частиц): а) у дейтона; б) у α -частицы.

Δ 42-12. При бомбардировке лития протонами с энергией 1 МэВ образуются две α -частицы. Определить их скорость для случая, когда направления их вылета образуют одинаковый угол с направлением полета протона.

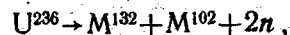
□ 42-13. Мишень, содержащая дейтерий (такой мишенью может служить «тяжелый лед»), бомбардируется дейтонами. При ударе дейтона в ядро дейтерия к дейтерию присоединяется один электрон и образуется легкий изотоп гелия ${}_{2}\text{He}^3$ и нейтрон. Какова энергия нейтрона (E_2), если энергия дейтона перед ударом равна $E_1 = 0,6$ МэВ и если скорость нейтрона направлена перпендикулярно к скорости ударяющего дейтона?

□ 42-14. Облучение нейтронами некоторых тяжелых атомов вызывает деление их ядер на две различные, близкие по мас-

сам, разлетающиеся с громадными скоростями частицы. В дальнейшем эти частицы, выбрасывая нейтроны и испытывая β -превращения, превращаются в ядра атомов со средними номерами. Допустив в качестве примера, что в результате деления ядра изотопа урана (${}_{92}\text{U}^{235}$) появятся ядра рубидия (${}_{37}\text{Rb}^{85}$) и цезия (${}_{55}\text{Cs}^{133}$), провести грубый подсчет выделяющейся при этом энергии.

Приняв, что средняя энергия, выделяющаяся при делении одного атома ${}_{92}\text{U}^{235}$, равна 200 Мэв, определить количество угля с теплотворной способностью $7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ эквивалентное энергии, выделяющейся при делении 1 кг урана.

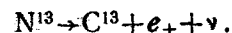
О 42-15. Найти энергию распада



если энергия связи на 1 нуклон составляет 6,5 Мэв для U и 7,5 Мэв в середине периодической системы (цифры условные).

О 42-16. Определить дозу облучения при поглощении энергии γ -излучения Co^{60} (энергию кванта принять 1,3 Мэв) в объеме, содержащем $M=70$ кг вещества. Время облучения $t=1$ сут, активность поглощенного излучения $A=100$ мки (милликури).

□ 42-17. Найти энергию распада для реакции



Указание. Энергии ядерного взаимодействия в этих ядрах считаются одинаковыми. Все изменение энергии связи обусловлено разностью энергий кулоновского взаимодействия.

О 42-18. Определить среднее время жизни нейтрона в газе ВН_3 . Давление атмосферное. Содержание изотопа В^{10} в природной смеси изотопов $q=18,7\%$. Сечение поглощения нейтрона $\sigma = \frac{A}{v}$, где $A=2 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$. Среднее время жизни свободно-

го нейтрона $\tau_n=10^8$ сек.

О 42-19. Критическая масса сплава, содержащего ${}_{92}\text{U}^{235}$, при температуре 15°C составляет 150 кг (рассматривается шар, помещенный в большом удалении от стенок комнаты). Линейный коэффициент расширения сплава равен $\alpha=1,7 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$. Найти, чему равна критическая масса при 25°C .

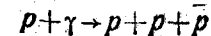
О 42-20. Импульсный реактор для генераций незамедленных нейтронов деления состоит из двух деталей из Pu^{239} , общая масса которых составляет $M=8$ кг. Эти детали приводят в сближение, обеспечивающее надкритическое состояние. Цепная реакция прекращается из-за теплового расширения, когда температура Pu^{239} повысится (в среднем по объему) на $\Delta t=50^\circ\text{C}$. Сколько нейтронов выдает реактор за импульс? Теплоемкость Pu^{239}

принять $c=10^2 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$. Кинетическую энергию осколков деления принять равной $E=170$ Мэв, среднее число нейтронов деления $\nu=3$.

Δ 42-21. Два самолета, летящие на одной высоте с равной скоростью v_0 , одновременно вылетают из точки, расположенной на экваторе, и облетают Землю по экватору в противоположных направлениях — с востока на запад и с запада на восток. На борту самолетов установлены сверхточные атомные часы. Чему равно изменение разности показаний часов к концу полета?

□ 42-22. Найти конечную скорость такой ракеты, у которой скорость истечения газа из сопла равна c . Начальная масса M_0 , конечная M_1 . Начальная скорость равна нулю.

□ 42-23. Фотон с энергией E поглощается покоящимся протоном с образованием пары протон — антипротон по реакции



Найти порог этой реакции.

ОТВЕТЫ

1-1. г) $4 \frac{м}{сек}$ и $5,4 \frac{м}{сек}$.

1-3. 150 м.

1-5. От 0 до 3,3 м — ускоренное, от 3,3 до 9 м — равномерное, далее замедленное.

1-6. б) Площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, показывает половину разностей квадратов скоростей, соответствующих конечному и начальному моментам движения.

в) Начальная и конечная скорости равны.

1-7. Нет.

1-8. а) Обозначим угол между направлением, в котором виден автомобиль, и направлением, по которому должен бежать человек, буквой α . Пусть человек прибежит к некоторому месту дороги через t_2 сек, а автомобиль приедет туда же через t_1 сек. Пользуясь рисунком 1, легко найти, что

$$\sin \alpha = \frac{h \cdot v_1 \cdot t_1}{b \cdot v_2 \cdot t_2}$$

По условию $t_1 > t_2$. Поэтому

$$\sin \alpha > \frac{h v_1}{b v_2}$$

Отсюда $56,5^\circ < \alpha < 123,5^\circ$.

б) $2,5 \frac{м}{сек}$.

1-9. Уменьшалось.

1-10. $+0,83 \frac{м}{сек^2}$ и $-0,83 \frac{м}{сек^2}$.

1-11. $t_n = t_1 (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) = 0,8$ сек.

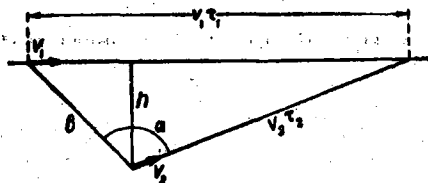


Рис. 1.

$$\text{Отсюда } \Delta s = R_0 \lg 2\pi n(t + \Delta t) - R_0 \lg 2\pi n t = \frac{R_0 \sin 2\pi n \cdot \Delta t}{\cos 2\pi n t \cdot \cos 2\pi n t (t + \Delta t)}$$

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{R_0 2\pi n}{\cos^2 2\pi n t} = 10,4 \frac{м}{сек}$$

1-15. В 12 раз.

1-16.

$$v_c = v \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}; \text{ при } \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha; \text{ при } \beta = 0.$$

1-17. $225 \frac{км}{ч}$; $4,4^\circ$ к меридиану.

1-18. а) и б) $v_2 > v_1$.

в) Против течения под углом 60° .

г) Первая требует времени больше на 2,14 мин.

д) При $v_2 = \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} \cdot v_1 = 2,9 \frac{км}{ч}$.

1-19. Точка, прямая, окружность, спираль Архимеда.

1-20. $0,25 \frac{м}{сек^2}$; $0,32 \frac{м}{сек^2}$.

1-21. $18,3 \frac{м}{сек^2}$; $16,7 \frac{м}{сек^2}$; $15,0 \frac{м}{сек^2}$.

1-22. $\omega = 6,5 \text{ сек}^{-1}$.

1-23. а) На круге будет видно четыре неподвижных размытых темных сектора, каждый около 67° .

б) Секторы будут казаться вращающимися в сторону, противоположную вращению диска при $n = 0,5 \text{ сек}^{-1}$.

1-24. а) Вертикально вниз; б) перпендикулярно к оси.

1-25. $-5,24 \text{ сек}^{-2}$; 375.

1-26. Через 10 сек.

1-27. $140 \frac{см}{сек}$ и $-20 \frac{см}{сек}$.

1-28. $4,25 \text{ сек}^{-1}$; 28° .

1-29. а) $-29 \frac{см}{сек^2}$; б) $9,6 \frac{см}{сек}$; $-17 \frac{см}{сек^2}$.

1-30. а) $40 \frac{см}{сек}$; б) $30 \frac{см}{сек}$; в) $60 \frac{см}{сек}$; г) $63 \frac{см}{сек}$.

1-31. $4,7 \frac{см}{сек^2}$.

1-32. Радиус колеса значительно меньше длины шатуна.

1-33. Совершает гармонические колебания по направлению оси балансира.

1-34. а) $84,3^\circ$; б) $90 \frac{см}{сек}$.

1-35. 0,06 сек.

1-36. Будут наблюдаться биения с частотой $0,5 \text{ сек}^{-1}$ и амплитудой 0,2 мм.

1-37. 8 гц и 10 гц; 1 см.

2-1. а) 204 м; б) $1,4 \cdot 10^{-7}$ см.

2-2. б) $g = 9,87 \frac{м}{сек^2}$.

2-3. 120 гц.

2-4. $t = \frac{v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - 2gn}}{g}$.

Верхний знак перед радикалом соответствует восходящему движению, нижний — нисходящему.

а) $t_1 = 0,98$ сек; $t_2 = 2,1$ сек; б) не будет.

2-5. 20,6 см.

2-6. а) Вниз со скоростью $12,4 \frac{м}{сек}$;

б) вверх со скоростью $8,5 \frac{м}{сек}$.

2-7. а) $t = \frac{2v_0 - g\tau}{2g} = 2,25 \text{ сек}$; $h = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{g\tau^2}{8} = 30,3 \text{ м}$.

2-9. $v_0 = s \sqrt{\frac{g}{2h}} \approx 11 \frac{м}{сек}$; $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} \approx 12,6 \frac{м}{сек}$.

2-10. Правильно.

2-11. 3 м.

2-12. 20 раз.

2-13. 76° .

2-14. а) Минимальная скорость при данном расстоянии соответствует самому выгодному углу бросания $\alpha = 45^\circ$ и равна $22,83 \frac{м}{сек}$; б) на экваторе при такой начальной скорости и $\alpha = 45^\circ$ получилось бы расстояние 53,3 м; в) следует указать: 1) высоту, с которой диск был брошен; 2) точную величину g для места метания; 3) угол, под которым диск был брошен.

2-15. Объем воды $V = S \cdot t \sqrt{\frac{s \cdot g}{\sin 2\alpha}} = 69 \text{ л}$.

2-16. Вертикальная прямая.

2-17. а) $\tan \alpha = \frac{v_0 \sin \alpha_0 - g t}{v_0 \cos \alpha_0}$; $\alpha_1 = 14,7^\circ$; $\alpha_2 = -35,7^\circ$;

б) $h = 10 \text{ м}$.

2-19. $63^\circ 26'$ и $26^\circ 34'$.

2-20. $v_0 = \frac{s}{2 \cos \alpha} \sqrt{\frac{2g}{s \cdot \tan \alpha + h}} = 19,8 \frac{м}{сек}$;

$\tau = \sqrt{\frac{2(h + s \cdot \tan \alpha)}{g}} = 3 \text{ сек}$;

$h_{\max} = \frac{(2h + s \cdot \tan \alpha)^2}{4(h + s \cdot \tan \alpha)} = 12,1 \text{ м}$.

2-21. $s = 8h \sin \alpha = 96 \text{ см}$.

2-22. $R_1 = \frac{v_0^2 \cos \alpha}{g} = 10,2 \text{ м}$; $R_2 = \frac{v_0^2}{g \cos \alpha} = 82 \text{ м}$.

3-1. а) $F = 5000 \text{ н}$; $t = 4 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$.

б) Пуля пробьет доску и вылетит со скоростью $141 \frac{м}{сек}$; $0,59 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^{-1}$.

3-2. 7,7 м.

3-3. В нижних частях подъема и спуска 10,299 м. В середине подъема и спуска 9,8 м. В верхних частях подъема и спуска 9,300 м.

3-4. $h_1 = h_2 \frac{2n}{n+1} = 40 \text{ см}$.

3-5. а) $47 \frac{см}{сек^2}$; б) 4,2 м.

3-6. а) $F = g \frac{m_1 m_2 (1 + \mu)}{m_1 + m_2} = 1,47 \text{ н}$;

б) не изменится; в) 2,08 н.

3-7. а) Нет; б) $\frac{(nm_1 - \mu m_2)(m_1 + m_2)}{(nm_1 + m_2)(m_1 - \mu m_2)} = 3,54$; в) 0,031.

3-8. $a = g \frac{2(2m_1 - m_2)}{4m_1 + m_2}$;

а) 0,4 g; б) 0; в) $-2g$; г) g .

3-11. а) $\tan 2\alpha_0 = -\frac{1}{\mu}$; $\alpha_0 = 45^\circ$; 52° ; б) $\mu = 0,27$.

3-12. $\mu = \tan \alpha \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = 0,1$.

3-13. $a_1 = g \left[\sin \alpha - \mu_1 \cos \alpha + \frac{m_2}{m_1} (\mu_2 - \mu_1) \cos \alpha \right]$;

$a_2 = g (\sin \alpha - \mu_2 \cos \alpha)$.

а) $a_1 = a_2$; б) $a_1 < a_2$; в) и г) $a_1 = a_2$; д) $a_1 = 0$; $a_2 \neq 0$.

3-14. 420 н.

3-15. Втягивая воду в полость, каракатица получает равные, противоположно направленные количества движения, а потому остается на месте; выбрасывая воду, каракатица отдает некоторое количество движения и движется с ускорением в противоположную сторону.

3-16. Надо рассматривать движение струны совместно с движением корпуса инструмента, на котором натянута струна.

3-17. Левая пройдет расстояние в 9 раз большее.

3-18. Положим, что с момента пуска ракеты уже прошло время t . За промежуток от t до $t + dt$ выбрасывается газа μdt .

Отсюда

$$\mu dt \cdot v_1 = -(m - \mu t) dv;$$

$$t = \frac{m}{\mu} \left(1 - e^{\frac{v}{v_1}} \right).$$

а) Принимая во внимание, что v и v_1 направлены в противоположные стороны, имеем $t = 0,375 \text{ сек}$.

б) Полагая $\mu t = m_0$, имеем $v = v_1 \ln \frac{m}{m - m_0}$ (формула Циолковского);

$v = 330 \frac{м}{сек}$.

3-19. а) Центр шарика 3.

б) Если ось X направить по линии 4—3, а ось Y по линии 4—1, то $x_0 = 5 \text{ см}$; $y_0 = 3 \text{ см}$.

в) Если ось X направить по линии 4—1, ось Y по линии 4—3, а ось Z по линии 4—2, то $x_0 = 1 \text{ см}$; $y_0 = 3 \text{ см}$; $z_0 = 2 \text{ см}$.

3-20. а) На общей оси цилиндров на расстоянии 9,3 см от нижнего основания; б) на расстоянии 10,6 см.

3-21. Центр инерции находится на расстоянии 0,56 дм от центра диска.

3-22. $19,5^\circ$.

3-24. 7,5 м.

3-25. а) $a = g \left(\frac{n-1}{n+1} \right) = 109 \frac{см}{сек^2}$; б) $47 \frac{см}{сек}$.

3-26. а) 20 см; б) 20 см; в) 20 см и 0; г) влево; результирующая сила равна нулю.

3-27. 20 см.

3-28. а) $5 \cdot 10^4 \text{ кДж}$;

б) $-16 \cdot 10^4 \text{ кДж}$.

3-29. 9000 кат; 2500 кат.

3-30. а) $0,176 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-2}$; $0,026 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-2}$; б) $66 \frac{км}{ч}$.

3-31. 24,5 кат.

3-32. $v_0 = 2 \cos \alpha \frac{v_1 \cdot v_2}{v_1 + v_2}$ Так как угол α уклона мал, то $v_0 = 4,2 \frac{м}{сек}$.

3-33. $\mu = \frac{2s}{gt^2} = 0,2$; $P = \frac{4ms^2}{t^3} = 46 \text{ ат}$.

3-34. 3,5 Дж.

3-35. $A = \frac{m}{2} \left(\frac{g^2 t^2}{4} + \frac{s^2}{t^2} \right) = 5,2 \text{ Дж}$.

3-38. а) $\left(\frac{n+1}{n-1} \right)^2 = 1,4$; б) $\frac{n+1}{n-1} = 1,2$; в) 9 раз и 3 раза.

3-39. Работа сжатия равна:

$$E - E_1 = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2,$$

где $v_1 - v_2$ есть относительная скорость движения шаров.

3-40. 93%.

3-41. а) $h_1 = l \frac{4m_2^2}{(m_1 + m_2)^2} = 16 \text{ см}$; $h_2 = l \frac{(m_1 - m_2)^2}{(m_1 + m_2)^2} = 36 \text{ см}$;

б) больший шар поднимется на 36 см, меньший сделает полный оборот; в) 3:1.

3-42. $-\frac{v}{5}$; $\frac{2\sqrt{3}}{5} v$.

3-45. а) $126 \frac{см}{сек}$ и $63 \frac{см}{сек}$; б) 60 см.

3-46. Цистерна первоначально движется вправо, так как вода в цистерне перетекает влево, и суммарный импульс воды в цистерне и цистерны первоначально должен быть равен нулю. Вытекающая вода уносит при этом импульс, направленный вправо. Поэтому цистерна приобретает скорость, направленную влево. Эта скорость остается у нее к моменту, когда вся вода вытечет, и уже больше не меняется.

Этот качественный ответ можно обосновать вычислениями.

Обозначим массу цистерны M_0 , скорость ее движения v_0 . Пусть масса воды в цистерне $M(t)$, средняя скорость движения воды в цистерне относительно цистерны v . Смещение трубки относительно центра тяжести равно l ($l < 0$).

Можно предположить, что

$$v = -\frac{l}{M} \frac{dM}{dt}.$$

Закон сохранения импульса имеет вид:

$$M_0 \frac{d}{dt} v_0 + \frac{d}{dt} (M[v_0 + v]) - v_0 \frac{dM}{dt} = 0.$$

Отсюда

$$v_0 = l \int_0^t \frac{dt}{M + M_0} \frac{d^2 M}{dt^2};$$

v_0 меняется так, как описано выше. В частности, так как

$$\int_0^\infty dt \frac{d^2 M}{dt^2} = 0 \text{ и } \frac{1}{M + M_0}$$

монотонно возрастает,

$$\frac{v_0(\infty)}{l} > 0.$$

4-1. а) 0,49 н; б) 6,37 н.

4-2. а) 981,4 дин; б) около 640 дин.

4-3. $x = \frac{lR_2^3}{R_1^3 + R_2^3} = 2,4 \text{ см}$; $\Delta x = \frac{k g}{\omega^2} = 0,12 \text{ см}$.

4-4. $h = \frac{R}{3}$.

4-5. а) $h_1 = \frac{2h + R}{3}$; б) $h \geq 2,5R$.

4-6. 0,29 н.

4-7. а) Получается пространственная кривая.

б) Для решения следует определить векторную сумму сил, действующих на отдельные элементы одной из половин цепочки. Эта сумма равна удвоенной искомой силе.

$F = mn^2 l = 4,8 \text{ н}$.

4-8. 550 мм рт. ст.

4-9. а) $F = 2mg \cos^2 \alpha$; б) $F = 2mg(3 - 2 \cos \alpha)$; в) $F = 2mg$.

4-10. $\lg \alpha = \sqrt{2}$; $\alpha = 54,7^\circ$.

4-11. $\cos \alpha = \frac{g}{4\pi^2 n^2 l}$; $\alpha = 78,6^\circ$.

4-12. а) $v = \sqrt{R\mu g} = 19 \frac{м}{сек}$; б) $\lg \alpha = \mu$; $\alpha = 21,8^\circ$.

4-13. а) $v = \sqrt{\frac{(0,5d - h)g}{\mu}} = 14 \frac{м}{сек}$; б) $\alpha = 11^\circ$.

4-14. $n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h}} = 0,4 \text{ сек}^{-1}$.

4-15. 0,96 сек⁻¹.

4-16. 43 н.

4-17. 7620 н и 9380 н.

4-18. а) $5 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^2$; б) $2 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^2$; в) $1 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^2$; г) $2 \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^2$.

4-19. а) ma^2 ; б) $ma^2(1 + \sin^2 \beta)$ (β — угол между осью и плоскостью).

4-20. а) 689 г·см²; б) 414 г·см²; в) 275 г·см².

4-21. Нуль и $2,26 \cdot 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$.

4-22. а) Момент силы F_1 сцепления колеса с рельсом относительно оси колеса $M_1 = F_1 r$ и момент трения качения в точке касания $M_2 = kPr$. При ускоренном движении колеса первый из этих моментов возрастает на величину arl , где a — линейное ускорение, I — момент инерции колеса.

$$M_1 = \frac{al}{r} + kPr, \quad F_1 = -\frac{al}{r^2} - kP.$$

Сила, приложенная к оси, равна:

$$F_0 = -F_1 + ma,$$

где m — масса колеса,

$$F_0 = ma + \frac{al}{r^2} + kP.$$

б) Те же моменты; так как $F_0 = 0$, то

$$a = -\frac{kP}{m + \frac{I}{r^2}}.$$

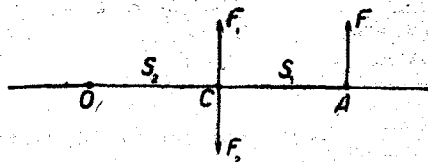


Рис. 2.

4-23. а) $g \sin \alpha$; б) $0,67 g \sin \alpha$; в) $1,14 g \sin \alpha$.

4-24. $a = 5g \sin \alpha \frac{4r^2 - d^2}{28r^2 - 5d^2} = 49,7 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$.

4-25. а) Приложим мысленно в точке C две равные и противоположные силы $F_1 = F_2 = F$ (рис. 2). Сила F_1 вызовет поступательное движение стержня с ускорением $a = \frac{F}{m}$. Пара сил F и F_2 вызовет вращение с угловым ускорением $\varepsilon = \frac{F \cdot s_1}{J_C}$ около оси, проходящей сквозь центр масс C . Вследствие вращения стержня точка O будет двигаться с линейным ускорением $as_2 = \frac{F \cdot s_1 s_2}{J_C}$. Если точка O покоится, то

$$\frac{F \cdot s_1 s_2}{J_C} = \frac{F}{m},$$

откуда

$$s_1 s_2 = \frac{J_C}{m},$$

б) повернется около точки A ;

в) $s_2 = \frac{l}{6}$, где l — длина стержня.

4-26. 25 ат.

4-27. 22,2 кДж.

4-28. а) $v = \sqrt{3gh} = 12 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; б) точка, находящаяся на высоте, равной $\frac{2}{3}$ высоты столба.

4-29. а) $F = \frac{m(g-a)}{2}$, где a — ускорение, с которым колесо опускается;

$$a = \varepsilon r = \frac{m(g-a) \cdot r}{J} \cdot r,$$

отсюда

$a = \frac{mgr^2}{mr^2 + J}$; $F = \frac{mgJ}{2(mr^2 + J)} = 4,85 \text{ н}$; б) при подъеме — то же натяжение;

в) 4,90 н.

4-30. Ось цилиндра будет двигаться с ускорением:

$a_1 = g \frac{2 \sin^2 \alpha}{1 + 3 \sin \alpha} = 1,96 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$. Груз будет двигаться с ускорением: $a_2 = 3,92 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

4-31. а) $\varepsilon = g \frac{2(m_1 - m_2)}{l(m_1 + m_2)}$, $F = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$; б) $\omega = 2 \sqrt{\frac{(m_1 - m_2)g}{(m_1 + m_2)l}}$.

4-32. а) $\omega = \frac{6m_1 v}{(m + 3m_1)l} = 29 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1}$; б) кинетическая энергия

стержня с застрявшей в нем пулей равна $\frac{3m_1}{m + 3m_1}$ от начальной энергии системы, т. е. 3%.

4-33. а) Сумма кинетических энергий диска и грузиков уменьшается на величину совершенной работы; б) сумма количеств движения диска и грузиков в любой момент равна нулю; в) момент количества движения диска убывает, момент количества движения грузиков настолько же возрастает.

4-34. $A = \pi^2 m (l_1^2 - l_2^2) n_1 n_2 = 48 \text{ Дж}$.

4-35. а) $\omega = \frac{J_1 \omega_1 + J_2 \omega_2}{J_1 + J_2}$;

б) энергия уменьшается на величину $\frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \cdot \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{2}$.

4-36. а) Система, состоящая из двух дисков A и B , не является замкнутой, а потому закон сохранения моментов количеств движения к ней не относится; б) центры инерции гантелей движутся с антипараллельными скоростями. Поэтому система двух гантелей имеет момент количества движения, равный $2m \cdot d \cdot 2v$ (здесь $2m$ — масса гантели; d — расстояние между направлениями скоростей центров инерции гантелей; $2v$ — относительная скорость гантелей). После удара скорость центра инерции каждой из гантелей равна нулю, зато каждая гантель имеет момент количества движения $2md \cdot v$. Сумма моментов количеств движения обеих гантелей равна $4md \cdot v$, т. е. моменту количества движения всей системы до удара.

4-37. а) Момент количества движения стержня до разрыва равен $\frac{1}{12} K$, где $K = ml^2 \omega$ (m — масса стержня; l — длина; ω — угловая скорость). После разрыва каждая из половинок продолжает вращаться с той же угловой скоростью. Сумма моментов количеств движения обеих половинок равна $\frac{1}{48} K$. Кроме того, так как центры инерции половинок движутся с антипараллельными скоростями, система из двух половинок имеет момент количества движения, равный $\frac{1}{16} K$,

$$\frac{1}{48} K + \frac{1}{16} K = \frac{1}{12} K,$$

т. е. моменты количеств движения до и после разрыва равны.

б) Кинетическая энергия стержня до разрыва равна

$$\frac{1}{24} A, \text{ где } A = ml^2 \omega^2.$$

После разрыва энергия вращения половинок равна $\frac{1}{96} A$. Энергия поступательного движения половинок равна $\frac{1}{32} A$. Общая сумма энергий после разрыва равна

$$\frac{1}{96} A + \frac{1}{32} A = \frac{1}{24} A.$$

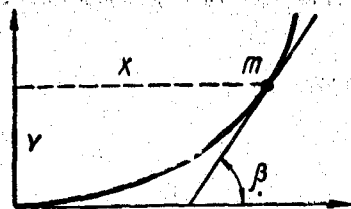


Рис. 3.

4-38. а) $0,75 \text{ мв}^2$; б) $0,7 \text{ мвт}$;

в) $1,25 \text{ мв}^2$.

4-39. $1,3 \text{ см}$.

$$4-40. a = \frac{k'g}{1 + \frac{I}{mr^2}}$$

откуда $k' = 0,05$.

4-41. $a < kg$.

4-42. При $\lg \alpha < 3,5 \mu - 2,5 \frac{k'}{r}$;
 $\alpha < 38^\circ$.

4-43. $0,73 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$; 12 сек^{-1} .

4-44. 1000 кдж .

4-45. $h = 1,7(R - r)$.

4-46. $0,63 \text{ н}$.

4-47. $1,67 \text{ км}$.

4-48. а) Принимаем, что расстояние центра инерции человека от пола мало. В таком случае высота центра инерции человека над уровнем пола в середине равна (рис. 3)

$$y = \frac{x^2}{2p},$$

где p — полупараметр параболы, x — расстояние человека от оси. Если угловая скорость $\omega = \sqrt{\frac{g}{p}}$, то

$$m\omega^2 x = mg \lg \beta,$$

что и означает, что сила, действующая на человека, нормальна к поверхности пола.

б) При удалении человека от оси вращения на расстоянии x энергия системы возрастает на величину

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{mv^2}{2} + mgy.$$

Но $v = \omega \cdot x$ и $v^2 = \frac{gx^2}{p} = 2gy$. Поэтому $\Delta \mathcal{E} = 2mgy$.

в) Во время движения человека от оси вращения двигатель, вращающий сооружение, работает с большей мощностью, чем при перемещаемом человеке. Если человек идет по полу со скоростью $\frac{ds}{dt}$, то действует сила

Кориолиса

$$2m\omega \frac{ds}{dt} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = 2m\omega \frac{dx}{dt}.$$

Поэтому при движении человека двигатель дает дополнительную мощность

$$2m\omega^2 x \frac{dx}{dt}.$$

За время dt двигатель производит дополнительную работу

$$2m\omega^2 x dx,$$

а за все время движения человека от оси будет произведена дополнительная работа

$$m\omega^2 x^2 = 2mgy.$$

Итак, изменение энергии системы происходит за счет дополнительной работы двигателя при перемещении человека.

4-49. Нет.

4-50. $a = -\frac{kP}{m + \frac{I}{r^2}}$. См. ответ задачи 4-22.

$$a = -\frac{kg}{2} = -4,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

$$4-51. F = \frac{P(k_1 + k_2)}{2} = 150 \text{ н}.$$

5-1. $0,59 \text{ дин}$.

5-2. Нет.

5-3. а) Нет; б) $1,23\%$.

5-4. $2,34 \cdot 10^{-3} \text{ н}$.

5-5. Шары притягиваются, если а) $D_1 > D_0$ и $D_2 > D_0$; б) $D_1 < D_0$ и $D_2 < D_0$. Шары отталкиваются, если $D_1 > D_0 > D_2$ или $D_1 < D_0 < D_2$.

5-6. а) $F = \frac{\gamma m_1 m_2}{a(a+l)}$; б) уменьшится в 1,33 раза.

5-7. Около 120 н .

5-8. См. рисунок 4: а) крестики, б) кружочки.

$$5-9. \frac{4}{3} \gamma \pi D l.$$

5-10. а) Задача допускает простое количественное решение, если средняя плотность корабля ρ много меньше средней плотности воды. В этом случае корабль почти весь находится вне воды и средняя напряженность

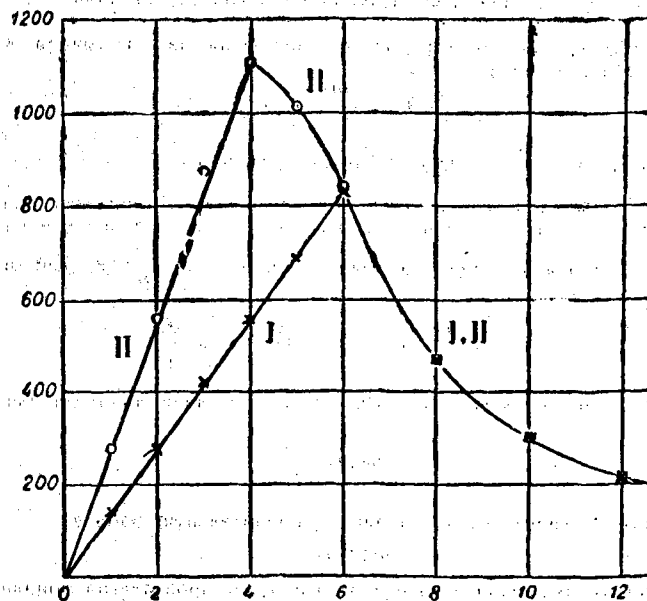


Рис. 4.

поля тяготения, действующая на корабль, меньше напряженности, действующей на воду, в

$$\frac{R^2}{(R+h)^2} \approx 1 - \frac{2h}{R} \text{ (раз),}$$

где R — радиус Земли.

Поэтому масса корабля больше массы вытесненной воды на

$$\Delta m = m \frac{2h}{R} = 16 \text{ кг.}$$

В общем случае Δm может быть в несколько раз меньше.

б) В том же предельном случае $\rho_{\text{воды}} \gg \rho$ результирующая сила оказывается равной нулю, так как расстояние между центрами масс кораблей больше, чем расстояние между центрами масс вытесненной воды в

$$\frac{R+h}{R} \text{ (раз).}$$

5-11. 38 400 км от центра Луны.

5-12. Около 600 км; $7,7 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$; $2,5 \cdot 10^8$ кдж.

$$5-13. \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 0,85.$$

5-14. Сила притяжения массы m_1 , находящейся на расстоянии x от центра Луны, равна $\frac{\gamma m m_1}{x^2}$, где m — масса Луны. Работа силы тяжести на пути dx есть $dA = \frac{\gamma m m_1}{x^2} dx$, а на пути из бесконечно удаленной точки до поверхности Луны есть

$$A = \int_R^\infty \frac{\gamma m m_1}{x^2} dx = \frac{\gamma m m_1}{R} = 0,5 m_1 v^2;$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma m}{R}} = 2,38 \frac{\text{км}}{\text{сек}}.$$

5-15. 1600 км.

5-16. Радиус орбиты уменьшится на 2%, скорость увеличится на 1%, период обращения уменьшится на 3%.

5-17. Принимая, что потенциальная энергия тел, удаленных на бесконечное расстояние, равна нулю, найдем

$$W = \frac{\gamma m m_c}{2a},$$

где m_c — масса Солнца.

5-18. Падение на Солнце можно рассматривать как предельный случай обращения вокруг Солнца по весьма вытянутому эллипсу, большая ось которого немного больше радиуса a орбиты Земли. Такой эллипс стал бы описывать вокруг общего центра тяжести тело, помещенное в пространстве на расстоянии a от центра и получившее одновременно небольшую скорость v по направлению, перпендикулярному к прямой, соединяющей это тело с центром. В пределе, при $v=0$, большая ось эллипса равна a (эллипс вытягивается

в прямую). Обращение по такому эллипсу требует времени $\tau = T \sqrt{\frac{(0,5a)^3}{a^3}} = T \sqrt{0,125}$, где T — период обращения Земли вокруг Солнца. Продолжи-

тельность же падения тела на Солнце есть $\frac{\tau}{2} = \frac{T \sqrt{0,125}}{2} = 64,6$ суток.

5-19. По закону сохранения углового импульса (момента импульса)

$$v_R R = v_R' R,$$

где R — радиус Земли, v_R — скорость метеорита вблизи поверхности Земли. Из закона сохранения энергии следует:

$$v_R^2 = v_0^2 + v^2,$$

где $v_0 = 11 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$ — вторая космическая скорость.

Отсюда

$$\sigma = \pi R^2 \left(1 + \frac{v_0^2}{v^2}\right) = 5 \pi R^2.$$

$$5-20. \omega^2 = \frac{\gamma(m_1 + m_2 + m_3)}{a^3}.$$

6-1. а) 3,5 н; б) 0,17 н; в) 4,4 н или 0,16 н.

6-2. 212 н.

$$6-3. F_1 = \frac{mg \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = 20 \text{ н}; F_2 = 34 \text{ н}.$$

6-4. Задача неопределенна. В этом случае силы зависят от обстоятельств, при которых шар был помещен в положение, показанное на рисунке 6-2.

6-5. $1,24 \cdot 10^4$ н.

6-7. 650 н; 750 н.

6-8. 83,5 см.

$$6-9. F_1 = \frac{mgR}{\sqrt{R^2 - 4R^2}} = 0,38 \text{ н} = F_2; F_3 = 0,29 \text{ н}.$$

6-10. На опору A действует под углом к горизонту сила $1,13 \cdot 10^4$ н. На опору B действует в горизонтальном направлении сила $9,15 \cdot 10^3$ н.

6-11. а) 940 н; 960 н; б) 950 н; 950 н.

6-12. а) 8,7 н и -2,7 н; б) 6,5 н.

$$6-13. \text{ а) } \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{2\mu}; \varphi = 45^\circ.$$

б) Если человек встанет на нижнюю ступеньку, то лестница не упадет, она упадет, когда человек перейдет через середину лестницы.

$$6-14. \text{ а) } \cos \alpha = \frac{h}{l} \sqrt{\frac{D_0}{D_0 - D}}; \alpha = 48^\circ; \text{ б) } \alpha = 0.$$

$$6-15. A = \frac{\sqrt{2}-1}{2} g \sqrt{\frac{m^4}{D}} = 1,2 \cdot 10^2 \text{ дж.}$$

6-16. 1,73 дж.

6-17. При волочении работа равна $A_1 = mg \mu L$, где m — масса ящика.

При кантовании ящик приходится опрокидывать $n = \frac{L}{a}$ раз (a — ребро ящика). Работа при одном опрокидывании равна $mga \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2}\right) = 0,207 mga$.

При n опрокидываниях работа равна $A_2 = 0,207 mgL$. Работы A_1 и A_2 равны при $\mu = 0,207$.

6-18. а) Условие отсутствия соскальзывания карандаша:

$$\operatorname{tg} \alpha < \mu.$$

Условие возвращения в положения равновесия:

$$\operatorname{tg} \alpha < \frac{d_1}{d_2} \alpha - \frac{2b}{d_2},$$

где b — расстояние центра инерции второго карандаша от вертикали, проходящей сквозь ось первого карандаша при горизонтальном расположении второго. Это условие может иметь место только при $\frac{d_1}{d_2} > 1$.

б) Карандаш соскальзывает при $\alpha > 26^\circ$, карандаш опрокидывается при $\alpha > 24^\circ$. Следовательно, предельное значение угла α равно 24° .

7-1. 177 м.

7-2. а) $4,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; б) $7,5 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

7-4. $n = \frac{\sqrt{2\rho m}}{\pi l \sqrt{D}} = 82,5 \text{ сек}^{-1}$.

7-5. На 0,32 см.

7-6. На 2,7 см.

7-7. Нет.

7-8. На $\frac{\pi d^3 p}{4Eb} = 1,06 \text{ см}^2$.

7-9. Около 200 м.

7-10. 56,5 л.

7-11. Около 10%.

7-12. $\Delta d = \frac{\pi^2 d^3 D n^2}{E} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

7-13. Нет. Удлинение будет равно $2\mu^2 \Delta l$.

7-14. а) $\Delta V = \frac{l(1-2\mu)F}{E} = 8 \text{ мм}^3$; б) $\Delta S = \frac{4l(1-\mu)F}{Ed} = 0,28 \text{ см}^2$.

7-15. 1,4 Дж.

7-16. $5,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

7-17. $2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

7-18. На 4,2 см.

7-19. $6,9 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

7-22. Кинетическая энергия грузика равна разности изменения потенциальной энергии грузика в поле тяготения $mg l_1$ и работы растяжения нити $A = \frac{f(l_1 - l)}{2}$. Вычисление силы f в этом «поправочном» члене производим приближенно, заменяя радиус кривизны и скорость движения грузика величинами, относящимися к нерастяжимой нити длиной l ,

$$f \approx 3mg; v \approx \sqrt{g(3l - l_1)} \approx 3,68 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

7-23. $2,5^\circ$.

7-24. Формула $\Pi = \frac{F \Delta l}{2}$ относится к случаю справедливости закона

Гука, когда, в частности, нет гистерезиса.

8-1. а) $2,5 \text{ сек}^{-1}$; б) $a = g$.

8-2. 32 н.

8-3. а) $A < 10^{-4} \text{ см}$; б) $A = \frac{g}{\omega} \sqrt{\frac{2h}{g} - \frac{1}{\omega^2}} = 7,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

8-4. 0,8 сек.

8-5. 11,5 сек.

8-6. В первом в 1,11 раза скорее.

8-7. $T = 2\pi \sqrt{\frac{l \cos 0,5\varphi}{g}} = 1,7 \text{ сек}$.

8-8. а) 1,419 сек; б) $T = 2\pi \sqrt{\frac{l^2}{g^2 + a^2}} = 1,397 \text{ сек}$;

в) $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \cos \alpha}} = 1,444 \text{ сек}$.

8-9. $T = 2\pi \sqrt{\frac{l(n+1)}{g(n-1)}} = 2,1 \text{ сек}$.

8-10. 1,74 сек.

8-11. а) 0,63 сек; б) 1,5 сек.

8-12. а) $2\pi \sqrt{\frac{2l}{3g}}$; б) $0,211 \text{ л}$; $2\pi \sqrt{\frac{l}{g\sqrt{3}}}$.

8-13. 2,2%.

8-14. $J = \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} \cdot \frac{ml}{4\pi^2} (4\pi^2 l - T_2^2 g) = 1200 \text{ г} \cdot \text{см}^2$.

8-15. $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2SDg}} = 0,77 \text{ сек}$.

8-16. $T = 2\pi \sqrt{\frac{1,4(R-r)}{g}}$,

где R — радиус чашки, r — радиус шарика.

8-17. $\tau = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3\pi}{\gamma \cdot D}} = 21 \text{ мин}$.

8-18. а) $T = \frac{2\pi}{\sqrt{D\left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}\right)}}$; б) период колебаний увеличится в $\sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_2}}$ раз.

8-19. 1,55 сек.

8-20. а) Колебания шара синусоидальны при малых h ;

б) $A > \frac{mgl}{ES} = 0,12 \text{ см}$; в) $T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{ES}} = 0,07 \text{ сек}$.

8-21. При отклонении спицы в сторону равнодействующая сил трения направлена противоположно смещению x центра тяжести от середины расстояния между блоками и равна

$$F = -\frac{2mg\mu x}{d},$$

отсюда

$$T = \pi \sqrt{\frac{2d}{\mu g}} = 0,9 \text{ сек}.$$

8-22. 21 сек.

8-23. $n_0 = \frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 + n_3 - 2n_2^2} = 10,4$.

8-24. 0,014.

$$8-25. t = \frac{\ln \sqrt{n}}{\delta \cdot f} = 14 \text{ сек.}$$

8-26. 2 м.

$$8-27. \text{ а) } 1,5\%; \text{ б) } \operatorname{tg} \omega t = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{2\pi}{\ln 3}; \omega t = 80^\circ 5'; \text{ в) } \omega t = 160^\circ 10'.$$

8-28. а) Нет; б) да; в) в случаях б) около 19 и 1 (декремент 19 надо признать лишенным реального смысла).

$$8-29. 21 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$8-30. f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = 245 \text{ гц.}$$

$$8-31. f = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{2}} = 255 \text{ гц.}$$

$$8-32. \alpha = \frac{\pi \Delta f}{\sqrt{3}} = 36 \text{ сек}^{-1}.$$

$$8-33. s = \frac{s_0}{2} \left(\frac{2\pi}{\theta} + \frac{\theta}{2\pi} \right); \text{ при } v < 1 \text{ можно принять, что } s = \frac{\pi s_0}{\theta},$$

$$\text{откуда } \theta = \frac{\pi s_0}{s} = 0,4.$$

8-34. Принимая во внимание пункт 8) введения, найдем коэффициент затухания колебаний струны

$$\alpha = \frac{f_0^2 - f^2}{4 \sqrt{n-1} \cdot \pi f},$$

где n — отношение мощностей при f_0 и f . Отсюда $t = 43 \text{ сек.}$

8-35. 170 Дж.

$$8-36. T = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{da}{\sqrt{2 \cos a}} = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{2(u-u^2)}}.$$

Заменяя приближенно $2(u-u^2)$ на $3(u-u^2)$ (коэффициент выбран так,

$$\text{что } \int_0^1 2(u-u^2) du = \int_0^1 3(u-u^2) du, \text{ имеем } T \approx \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ т. е. на } 15\%$$

больше периода малых колебаний.

$$9-1. \text{ а) } 242 \frac{\text{см}}{\text{сек}}; \text{ б) } 242 \frac{\text{см}}{\text{сек}}; \text{ в) } 257 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \text{ и } 227 \frac{\text{см}}{\text{сек}}; \text{ г) } 171 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \text{ и } 342 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

9-2. 46 см.

9-3. в) На половине расстояния от поверхности стола до уровня воды в сосуде.

9-4. а) Равнозамедленно; б) 227 сек; в) 65 сек; г) увеличится.

9-6. Пренебрегая S_2 по сравнению с S_1^2 , получим

$$t = \frac{IS_1}{S_2} \sqrt{\frac{S_1 D}{2F}} = 0,53 \text{ сек.}$$

$$9-7. v = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \frac{16V^2}{\pi^2 l^2 d^4}}} = 32 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

9-8. а) На уровне нижнего конца трубки В; б) выше нижнего конца трубки В.

$$9-9. \text{ На } 5,2 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

$$9-10. m = \pi d_1^2 d_2^2 t \sqrt{\frac{pD}{8(d_1^4 - d_2^4)}} = 107 \text{ кг.}$$

9-11. Поднимается.

9-12. а) $Re = 5,4 \cdot 10^{-6}$; предположение правильно; б) 4,5 мм.

9-14. 12,5 км.

$$9-15. \text{ а) } 10^6; \text{ б) } 720 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

$$9-16. \text{ а) } 16,5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}; \text{ б) } 5,4 \text{ мм рт. ст.}$$

9-17. Около 0,01 см².

10-1. Объем не изменится; длина увеличится, если более холодный брусок имеет меньшую площадь сечения, параллельного плоскости соприкосновения.

10-2. Да.

10-3. а) 420° С; б) 140° С.

10-4. При условии $2\alpha_2 = \alpha_1$ (например, алюминий и железо).

10-6. На 16 сек.

$$10-7. \omega = \omega_0 \frac{1}{(1 + \alpha t)^2}, \text{ где } \alpha \text{ — коэффициент линейного расширения.}$$

Кинетическая энергия уменьшится на величину $\approx J_0 \omega_0^2 \alpha t$.

10-8. Если первый сосуд расширяется кверху, то уровень жидкости во втором сосуде понижается, и наоборот. При цилиндрическом сосуде уровень остается неизменным.

10-9. Около 47° С.

$$10-10. \beta_2 = \frac{P_2 - P_1 + \beta_1 t (P_2 - P_0)}{(P_1 - P_0) t} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1},$$

где β_1 — коэффициент объемного расширения ртути.

10-11. 754,6 мм.

10-12. 173° С.

11-1. 79.

11-2. 571 мм рт. ст.

11-3. а) 3,5 см; б) больше 95 см.

11-4. $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$

$$11-5. D = \frac{m h_2}{V (h_2 - h_1)} = 1,2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

$$11-6. 7,2 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

11-7. 150 см³.

11-8. 637.

11-9. 554 л.

$$11-10. 16 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

$$11-11. 1,82 \frac{\text{л}}{\text{г}}.$$

11-12. 1320 г.

11-13. 1,48 з.

$$11-14. u = \frac{mRT}{\mu p S \tau} = 0,9 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

11-15. 3 $\frac{\text{см}}{\text{сек}}.$

11-16. а) Подъемная сила

$$F = -(m_1 - m_2)g = m_1 g \left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right),$$

где m_1 и m_2 — массы водорода и вытесненного воздуха. Но $\frac{m_2}{m_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$, поскольку давление, температуру и объем воздуха и водорода можно считать равными. Пока m_1 неизменно (газ не вытекает из оболочки), F постоянна; б) 2 кг.

11-17. 29,3 м.

11-18. 2,4.

11-19. 2 ат.

11-20. 30,2 $\frac{\text{г}}{\text{моль}}.$

11-21. 0,48 $\frac{\text{г}}{\text{л}}.$

11-22. 1,45 $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$

11-23. 1950 м.

11-24. 20 н.

11-25. 758 мм рт. ст.

12-1. а) $c_p = 649 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; c_v = 908 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$

б) $c_p = 1040 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; c_v = 741 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$

12-2. $\kappa = 1,47.$

12-3. 1400 кал.

12-4. $t_2 = t_1 + \frac{v_2}{2c_v} = 22^\circ \text{C}.$

12-5. $3,15 \cdot 10^7 \text{ дж}.$

12-6. Около 5 м³ и 5,5 м³.

12-7. Сначала определим массу продуктов горения

$$m = \frac{pV\mu}{RT} = 35,8 \text{ з.}$$

При сгорании выделится количество теплоты

$$Q = 0,9 \cdot 10^6 \text{ кал}$$

■ получится температура

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{mc_v} = 1690^\circ \text{C}.$$

При этом создается давление

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = 20,3 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

12-8. $Q = 1,66 \cdot 10^4 \text{ дж. } \Delta U = 1,18 \cdot 10^4 \text{ дж. } A = 4,8 \cdot 10^4 \text{ дж.}$

12-9. $A = p_0 S \left(h_1 - h_0 \ln \frac{h_0 + h_1}{h_0} \right) = 2,37 \text{ дж.}$

12-10. а) 2,5 л·атм; -6,5 л·атм; -9 л·атм;
б) 2,5 л·атм; -0,5 л·атм; -3 л·атм.

$$12-11. \frac{A_2}{A_1} = \frac{1 - n^{\frac{x-1}{x}}}{(x-1) \ln n}; \text{ а) } 1,5; \text{ б) } 0,8.$$

12-12. 450° C.

$$12-13. \Delta T = -\frac{g}{c_p} \Delta h = -5^\circ.$$

12-14. $p = 32,4 \text{ атм; } t = 491^\circ \text{C; } A = 4300 \text{ дж.}$

12-15. а) 2,5 л·атм; -3 л·атм; -5,5 л·атм;

б) 2,5 л·атм; -2,11 л·атм; -4,61 л·атм.

$$12-16. T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{2Sp_0\kappa}} = 0,065 \text{ сек.}$$

12-17. См. рисунок 5.

$$12-18. p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}; T = \frac{\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2}}{\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2}}.$$

12-19. Работа компрессора за один цикл определяется суммой площадей $ABGF$ и $BCOG$ за вычетом площади $ADOF$, определяющей работу по движению поршня назад. Так как $\square BCOG = p_2 V_2 = p_1 V_1 = \square ADOF$, то

$$\square ABGF + \square BCOG - \square ADOF = \square ABGF.$$

12-20. а) 37,8 квт; б) 3250 $\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}.$

12-21. Введем расчет для 1 г газа; $\eta = \frac{A}{Q_1}$. Работа A равна разности работ при двух адиабатных процессах; количество теплоты Q_1 принимаем равным количеству теплоты, требуемому для нагревания газа от T_2 до T_3 .

$$\eta = \frac{c_v (T_3 - T_4) + c_v (T_1 - T_2)}{c_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

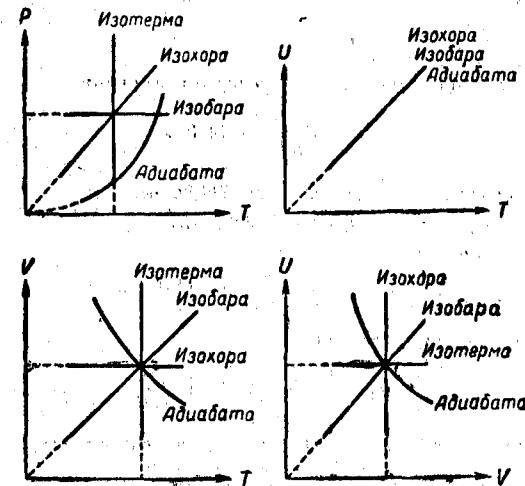


Рис. 5.

По уравнению адиабаты

$$T_3 V_2^{\kappa-1} = T_1 V_1^{\kappa-1}; \quad T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1},$$

откуда

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

Поэтому

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} = 0,34.$$

12-22. б) $c = c_v \frac{n-\kappa}{n-1}$. Поскольку c_v , n и κ постоянны, постоянно и c .

в) 1) Работа при повышении температуры газа на 1° по мере поднятия поршня уменьшается, уравнение процесса в нижней части цилиндра

$$p \frac{q-2V}{q-V_0} = \text{const}$$

(q — общий объем газа в цилиндре) не может быть приведено к виду $pV^n = \text{const}$. Процесс не политропический.

2) Уравнение процесса в газе

$$\frac{p-p_0}{V-V_0} = \text{const},$$

здесь p_0 — атмосферное давление; V_0 — объем газа при положении поршня, показанном на рисунке 12-6 пунктиром. Процесс не политропический.

3) Уравнение процесса в газе имеет такой же вид, как и в случае 2). V_0 означает объем газа в левой части трубки при равенстве уровней жидкости в левой и правой частях. Процесс не политропический.

4) Уравнение процесса в газе

$$pV^{\frac{\kappa+1}{2}} = \text{const}.$$

Процесс политропический.

г) В первых трех случаях удельные теплоемкости газов при повышении температуры уменьшаются. В случае 4) удельная теплоемкость газа постоянна и равна $-c_v$. Знак минус получился потому, что в данном процессе газ при повышении температуры отдает теплоту вовне.

13-1. $8 \cdot 10^{16}$.

13-2. $4,2 \cdot 10^{19}$.

13-3. $0,23$ мм рт. ст.

13-4. Из формулы $c = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$ имеем: $c_2^2 = c_1^2 = \frac{3R\Delta T}{\mu}$.

Подставляя $\Delta T = \frac{v^2}{2c_p}$ (см. решение задачи 12-4) и принимая во внима-

ние, что $c_v = \frac{R}{\mu(\kappa-1)}$, получаем: $c_2^2 - c_1^2 = \frac{3}{2} v^2 (\kappa-1)$.

Отсюда а) $c_2^2 - c_1^2 = v^2$; б) $c_2^2 - c_1^2 = 0,6v^2$.

Физический смысл этого таков. В одноатомном газе вся энергия поступательного движения идет на увеличение энергии поступательного движения молекул. В двухатомном газе на увеличение энергии поступательного движения молекул идет 0,6 энергии; 0,4 энергии идет на увеличение энергии вращательного движения молекул.

13-5. а) $502 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; б) $25 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

13-6. -203°C .

13-7. $c = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{kT}{\pi Dr^2}} = 169 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

13-8. а) Это видно из несимметричного вида кривой: ордината точки, соответствующей скорости, большей наиболее вероятной, более ординаты точки, соответствующей скорости, меньшей наиболее вероятной на такую же величину.

б) Единице.

в) Изменить абсциссы в $\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$ раз, а ординаты в $\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$ раз.

13-9. а) $u = 518 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; $\rho = 459 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

13-10. Нулю.

13-11. Полагая

$$s = \frac{mv^2}{2},$$

имеем:

$$\Delta n = n \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e^{1/n}}{m^{3/2} p^3} e^{-\frac{2s}{mp^2}} \Delta s = n \varphi(s) \Delta s.$$

Максимум функции $\varphi(s)$ соответствует

$$s_0 = \frac{mp^2}{3},$$

откуда скорость, соответствующая максимуму функции распределения, равна

$$v_0 = \frac{p}{\sqrt{2}}.$$

13-12. $\frac{\Delta n}{n} = \frac{4}{e\sqrt{\pi}} \cdot 0,02 = 1,66\%$; б) $1,85\%$.

13-14. Уменьшится в 2,3 раза.

13-15. а) $1,75 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

13-16. 55°C .

13-18. $4,6 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$

13-19. $6 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$

13-20. $9,3 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$

13-21. $7 \cdot 10^{20}$.

13-22. а) $6 \cdot 10^{-6} \text{ см}$; б) $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$; в) $9,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}$.

13-23. а) Не изменится; б) уменьшится в 1,41 раза; в) увеличится в 1,15 раза.

13-24. $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

13-25. $6 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

13-26. $2,7 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$.

13-27. Уменьшится в $\sqrt{\frac{\kappa+1}{2}} = 2,3$ раза.

13-28. $\tau = \frac{\sqrt{2\pi R\mu T}}{NpS} = 0,31 \text{ сек.}$

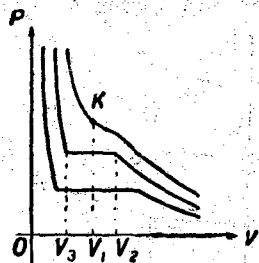


Рис. 6.

14-1. $p + \frac{a}{V^2}$ — давление, которое имело бы место, если бы все молекулы газа находились в объеме $V-b$ и не притягивались друг к другу.

14-2. а) 24,6 ат; б) 23,3 ат; в) 25,4 ат; г) 24,1 ат.

14-3. 25,6 ат; 29,5 ат.

14-4. 21° С; 0° С.

14-5. $b = 0,04 \frac{\text{л}}{\text{моль}}$; $a = 1,33 \frac{\text{л}^2 \cdot \text{ат}}{\text{моль}^2}$.

14-6. а) Более сжимаем при $T > \frac{a}{Rb}$;

б) 1020° К (углекислый газ); 112° К (водород).

14-7. а) $56,4 \frac{\text{л} \cdot \text{ат}}{\text{моль}}$; б) $56,8 \frac{\text{л} \cdot \text{ат}}{\text{моль}}$.

14-8. Выражая $p_1 V_1$ и $p_2 V_2$ по формуле Ван-дер-Ваальса и полагая $U_1 = U_2$, имеем

$$R \Delta T = (RTb - a) \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right).$$

Так как имеется в виду произвести приближенный расчет, то величину

$\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2}$ можно вычислить по формуле Клапейрона

$$\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} = \frac{p_2 - p_1}{RT}.$$

Отсюда

$$\Delta T = \left(Tb - \frac{a}{R} \right) \cdot \frac{p_2 - p_1}{RT}.$$

а) $-1,3^\circ \text{ К}$; б) $+0,2^\circ \text{ К}$; эти числа близки к экспериментальным результатам.

14-9. $0,2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

14-10. $\approx 53 \text{ ат}$; 157° К .

14-11. $a = 3,6 \frac{\text{л}^2 \cdot \text{ат}}{\text{моль}^2}$;

$b = 0,043 \frac{\text{л}}{\text{моль}}$.

14-12. а) Масса эфира, имеющая критический объем V_0 , равна

$$m = \frac{\mu}{V_k} V_0 = \frac{8\mu p_k}{3RT_k} V_0.$$

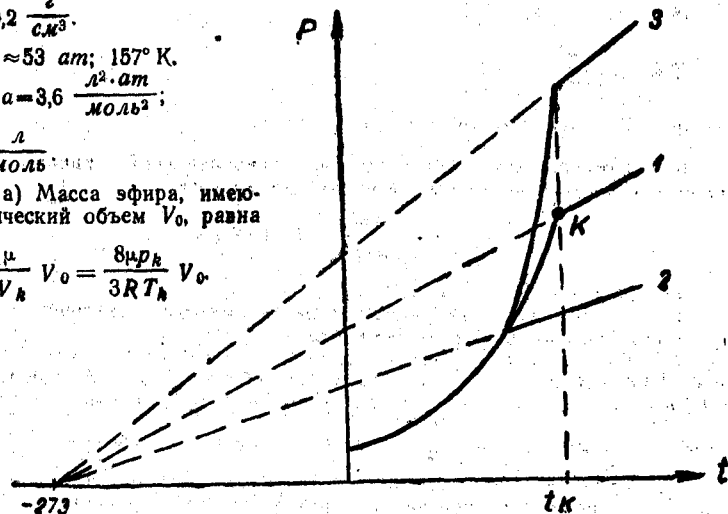


Рис. 7.

Ее объем при $t = 20^\circ \text{ С}$ (массой пара эфира над жидким эфиром можно пренебречь) равен:

$$V = \frac{m}{D} = \frac{8\mu p_k V_0}{3RT_k D},$$

отсюда $\frac{V}{V_0} = 0,26$;

б) если температура по всему объему трубки одинакова, то критическое состояние возможно лишь в том случае, если критический объем взятой массы эфира равен объему полости трубки. При меньшем количестве эфира вся жидкость в нагреваемой трубке испаряется до достижения критической температуры. При большем количестве — до достижения критической температуры вся трубка заполняется жидкостью, после чего давление в трубке быстро повышается. Это видно на рисунке 6; при $V = V_1$ можно наблюдать критическое состояние; при $V = V_2$ вся жидкость испарится; при $V = V_3$ весь объем будет заполнен жидкостью.

в) См. рисунок 7; 1-я кривая — объем трубки равен критическому объему; 2-я — меньше критического объема; 3-я — больше критического объема.

14-13. См. рисунок 8.

15-1. Около $1,007 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

15-2. $2,6 \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$.

15-3. а) $5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$; б) $2,3 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$.

15-4. Пренебрегаем поверхностью первоначальной капли по сравнению с суммой поверхностей всех мелких капелек.

$$A = \frac{6\pi\sigma}{d \cdot D} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

15-5. б) 6 см.

15-6. $\Delta R = 0$; так как гидростатическая разность давлений компенсируется аэродинамическими и вязкими силами.

15-7. На рисунке 9 черные кружки изображают сечения проволочек сита. При равновесии внутри жидкости вблизи точки А давление равно $p_0 + Dgh$ (p_0 — атмосферное давление). Разность давлений внутри и вне жидкости (Dgh) равна $\frac{2\sigma}{R}$, где R — радиус кривизны вблизи точки А.

Если при прикосновении пальцем получится поверхность с большим радиусом кривизны (показания пунктиром справа; $R_1 > R$), равновесие нарушится и жидкость будет вытекать, как показано на рисунке. Кроме того, поверх-

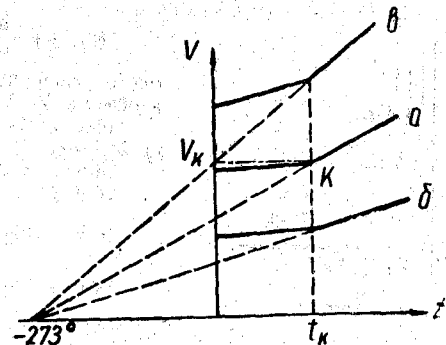


Рис. 8.

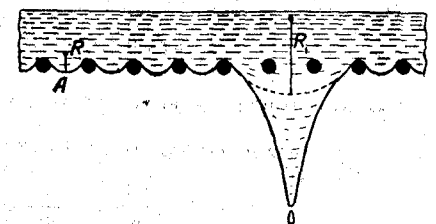


Рис. 9.

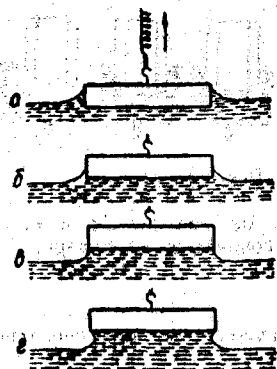


Рис. 10.

Заметим, что эта формула может быть выведена без упрощающих предположений, приведенных в тексте задачи. Обозначая элемент длины образующей поверхности dS , наклон поверхности φ , имеем выражение для кривизны

$$\frac{d\varphi}{dS} = \frac{ghD}{\sigma}.$$

Очевидно,

$$\frac{dh}{dS} = \sin \varphi.$$

Деля эти два уравнения друг на друга, находим:

$$hdh = \frac{\sigma}{gD} \sin \varphi d\varphi.$$

Интегрируя, получаем:

$$\frac{h^2}{2} = \frac{\sigma}{Dg} (1 - \cos \varphi).$$

При $\cos \varphi = -1$ это дает приведенную формулу.

Так как поверхность воды при положении $г$ (рис. 10) направлена вдоль поверхности пластинки и результирующая сил поверхностного натяжения, действующих на пластинку, равна нулю, то сила, действующая на пластинку, равна весу столба под ней

$$F = ShDg = 2S \sqrt{\sigma Dg} = 10500 \text{ дин} = 0,105 \text{ н.}$$

15-9. а) См. рисунки 11 и 12. Положение $б$ на рисунке 11 и $в$ на рисунке 12 соответствует наибольшей разности уровней в трубках; б) 41 мм; в) 27 мм.

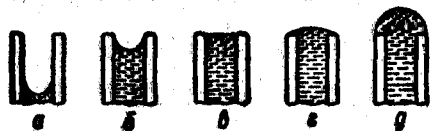


Рис. 11.

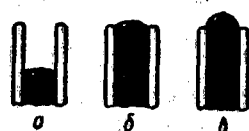


Рис. 12.

ностное натяжение жидкости может уменьшиться вследствие загрязнения ее пальцем.

15-8. а) Форма кривых поверхностей жидкости на рисунке 10 удовлетворяет соотношению $\frac{\sigma}{R} = Dgh$, где R — радиус кривизны;

h — высота рассматриваемой точки над поверхностью жидкости; на рисунке 8, в показано положение пластинки, соответствующее моменту ее отрыва. Максимум натяжения пружины соответствует несколько меньшей высоте h .

б) На основании указанных в задаче предположений имеем $\frac{2\sigma}{h} = Dg \frac{h}{2}$, откуда

$$h = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{Dg}}.$$

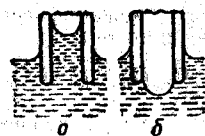


Рис. 13.

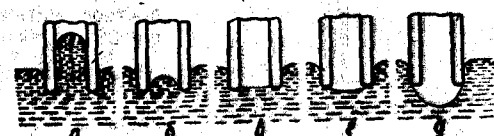


Рис. 14.

15-10. а) См. рисунки 13 и 14. Положение $б$ на рисунке 13 и $д$ на рисунке 14 соответствует наибольшему давлению воздуха в капилляре;

$$б) p_1 = Dgh_1 + \frac{4\sigma}{d_1} = 5500 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = 550 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

Радиусом пузырька по сравнению с глубиной погружения можно, очевидно, пренебречь;

$$в) 2150 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

$$15-11. P = \pi \sigma d = 3,5 \text{ дин}.$$

15-12. Уровень воды в трубке будет совпадать с уровнем воды в сосуде до тех пор, пока не дойдет до более узкого места. Затем уровень воды в трубке будет подниматься вместе с трубкой и поднимется до 14 см, после чего упадет до следующего узкого места, и т. д.

15-13. При давлении воздуха в узком колене на 3,5 мм рт. ст. больше, чем в широком.

$$15-14. h = \frac{4\sigma}{gD(d_1 - d_2)} = 5,7 \text{ см.}$$

$$15-16. 13 \text{ см.}$$

$$15-17. x = \frac{4h_0\sigma}{p_0d + 4\sigma} = 2,8 \text{ мм.}$$

$$15-18. а) 17,8 \text{ см; б) } 20 \text{ см.}$$

15-19. Справедливо лишь при условии, что поверхностное натяжение на границе между жидкостями равно разности поверхностных натяжений жидкостей на границе жидкость — пар (для каждой жидкости отдельно).

16-1. При адиабатическом расширении и охлаждении влажного воздуха в восходящих воздушных потоках происходит выпадение дождя. Освобожденный от части влаги воздух адиабатически нагревается в нисходящих потоках и оказывается ненасыщенным.

$$16-2. 2,8 \text{ см.}$$

$$16-3. 0,0052 \text{ мм рт. ст.}$$

$$16-4. 922 \text{ г.}$$

$$16-5. 1,14 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

16-6. а) Давление пара можно определить по таблице XX, давление воздуха пропорционально абсолютной температуре.

$$\text{Общее давление } p_1 = 1540 \text{ мм рт. ст.} = 2,05 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2};$$

б) так как при 100°C пары не будут насыщающими, то их давление можно вычислить, пользуясь характеристическим уравнением для идеальных газов.

$$\text{Общее давление } p_2 = 1620 \text{ мм рт. ст.} = 2,16 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}.$$

$$16-7. а) 30^\circ \text{C; б) } 29^\circ \text{C.}$$

$$16-8. а) 0,015 \text{ г; б) приблизительно при } 116^\circ \text{C; в) } 620 \text{ кал.}$$

$$16-9. 19,8 \text{ г.}$$

$$16-10. а) 37 \frac{\text{кал}}{\text{г}}; б) 46 \frac{\text{кал}}{\text{г}}.$$

16-11. 765 кал.

16-12. 768 мм рт. ст.

16-13. 0,013 мм. Равновесие неустойчиво. Пузыри меньшего размера исчезают, а большего бурно увеличиваются и поднимаются.

16-14. 9,41 мм рт. ст.

16-15. а) 7,67° С; б) 8,33° С.

16-16. $0,35 \frac{2}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$.

17-1. $P = 12 \text{ ат.}$

17-2. $P = 2,3 \text{ ат.}$

17-3. 0,26 г.

17-4. 3,7 мг.

17-6. На основании решения предыдущей задачи

$$\Delta p = \frac{D_1 m R T}{D_2 \mu V} = 1,2 \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно, давление паров воды равно 758,8 мм рт. ст.

17-7. Если стенки сосуда, в котором кипит раствор, и другие тела, с которыми соприкасается пар, выделяющийся из раствора, имеют температуру, равную температуре раствора или более высокую, то пар имеет температуру раствора. Если же стенки сосуда или термометр, опущенный в пар, имеют более низкую температуру, то пар конденсируется на них до тех пор, пока они не прогреются до температуры, которая соответствует температуре насыщающего пара при имеющемся атмосферном давлении. Таким образом, при отсутствии термометра температура пара равна температуре кипящего раствора. При наличии термометра пар конденсируется и температура его равна при нормальном атмосферном давлении 100° С.

17-8. а) На основании сказанного в тексте задачи

$$\theta = \frac{0,11}{3} \Delta p,$$

где Δp выражено в мм рт. ст.

Но

$$\Delta p = \frac{D_1 P}{D_2} = \frac{D_1 m R T}{\mu V D_2},$$

где $m = 1 \text{ г}$; $V = 100 \text{ см}^3$. Отсюда

$$C = \mu \theta = 5,1 \text{ град} \cdot \text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$$

б) $\mu = 283 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$.

17-9. На 0,13° С.

17-10. $7,76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

17-11. 750 мм рт. ст.

18-2. $0,62 \frac{\text{кал}}{\text{град}} = 2,6 \frac{\text{дж}}{\text{град}}$.

18-3. а) $-0,0476 \frac{\text{кал}}{\text{град}} = -0,199 \frac{\text{дж}}{\text{град}}$;

б) $-0,0664 \frac{\text{кал}}{\text{град}} = -0,277 \frac{\text{дж}}{\text{град}}$.

18-4. $-0,2 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-5. а) $-0,7 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$; б) $+0,7 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-6. $3450 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-7. Это видно из следующих соображений:

а) температура смеси равна: $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$;

$$\Delta S = m \ln \frac{T}{T_1} + m \ln \frac{T}{T_2} = m \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4 T_1 T_2} > 0,$$

так как

$$(T_1 + T_2)^2 > 4 T_1 T_2;$$

б) внутренние энергии газа в сосудах до смешения: $\frac{p_1 V}{\kappa - 1}$ и $\frac{p_2 V}{\kappa - 1}$;

после смешения: $2 \frac{p V}{\kappa - 1}$, где κ — отношение теплоемкостей.

Отсюда, так как обмен теплотой с окружающими телами отсутствует,

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

Таким образом,

$$\Delta S = m \left(c_v \ln \frac{p}{p_1} + c_v \ln \frac{p}{p_2} \right) + m c_v \ln \frac{(p_1 + p_2)^2}{4 p_1 p_2} > 0.$$

18-8. $+0,78 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-9. $\Delta S = \frac{p}{T} \left[V_1 \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1} + V_2 \ln \frac{V_1 + V_2}{V_2} \right] = 0,03 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-10. $+0,53 \frac{\text{кал}}{\text{град}}$.

18-11. Решение основано на том положении, что изменение энтропии системы зависит только от начального и конечного состояния системы. Изменение удельной энтропии пара при постоянном объеме при повышении

температуры от T_1 до T_2 равно $c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$. С другой стороны, процесс нагревания пара в постоянном объеме можно заменить следующим рядом процессов: 1) пар превращается в воду той же температуры; 2) получившаяся вода нагревается от T_1 до T_2 ; 3) вода превращается в пар; 4) получившийся пар изотермически расширяется до начального объема; так как в условиях задачи плотность пара невелика, то процесс расширения можно рассчитывать по формулам для идеального газа.

$$c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = - \frac{r_1}{T_1} + c_0 \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{r_2}{T_2} + \frac{R}{\mu} \ln \frac{v_1}{v_2},$$

где c_0 — удельная теплоемкость воды (в указанном интервале температур ее можно принять равной $1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$). Подставляя данные из таблицы XXI, найдем

$$c_v = 0,32 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}.$$

18-12. Обозначим процентное содержание конденсированного пара через x , абсолютную температуру и скрытую теплоту парообразования пара при давлении $14 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ через T_1 и r_1 ; при $0,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ — через T_2 и r_2 . В таком случае

$$S_2 - S_1 = \frac{r_2}{T_2} - \frac{r_1}{T_1} - c \ln \frac{T_1}{T_2} - x \frac{r_2}{T_2}.$$

При адиабатном процессе $S_2 - S_1 = 0$.
Отсюда

$$x = \frac{\frac{r_2}{T_2} - \frac{r_1}{T_1} - c \ln \frac{T_1}{T_2}}{\frac{r_2}{T_2}} = 21\%.$$

18-13. $-0,00756 \frac{\text{град}}{\text{ат}}$.

18-14. Около $542 \frac{\text{кал}}{2}$.

18-15. Полагая ввиду незначительности высоты h

$$\Delta p = D_2 g h, \text{ имеем } \Delta T = \frac{g h T \left(1 - \frac{D_2}{D_1}\right)}{r},$$

или, ввиду того что $\frac{D_2}{D_1} \ll 1$,

$$\Delta T = \frac{g h T}{r} = 0,0012^\circ \text{C}.$$

18-16. $114 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$.

18-17. $195 \frac{\text{кал}}{2}$.

Опыт дает около $550 \frac{\text{кал}}{2}$. Расхождение объясняется неправильностью

применения по отношению к отдельным молекулам понятий, касающихся собраний молекул.

18-18. $1,47 \text{ кдж}$.

18-19. $Q = A \frac{T_2}{T_2 - T_1} = 3 \text{ ккал}$.

18-20. Во-первых, вода в отопительной системе, являясь холодным телом в двигателе, получает $H \frac{T_3}{T_1}$ теплоты. Во-вторых, та же вода является горячим телом в холодильной машине и потому получает $H \frac{T_1 - T_3}{T_1} \cdot \frac{T_3}{T_2 - T_3}$ теплоты. Итого она получает при сжигании 1 кг топлива

$$H \frac{T_3 (T_1 - T_3)}{T_1 (T_2 - T_3)} = 14900 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}.$$

$$18-22. V = \frac{k T \ln \frac{n_2}{n_1}}{g h (D - D_0)} = 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3.$$

где D и D_0 — плотности гуммигута и воды.

19-1. $1360 \text{ ккал} = 5,69 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

19-2. $0,36^\circ \text{C}$.

19-3. $28,6^\circ \text{C}$.

19-4. $0,285 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$.

19-5. Примем, что ребро кубика равно 1 см. Обозначим число пар пластинок и их толщины n , b_1 и b_2 . Тогда

$$n(b_1 + b_2) = 1; \lambda_{\perp} = \frac{1}{n \left(\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} \right)}; \lambda_{\parallel} = n(b_1 \lambda_1 + b_2 \lambda_2);$$

$$\frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}} = n^2 \left[b_1^2 + b_2^2 + b_1 b_2 \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{\lambda_1 \lambda_2} \right] > 1,$$

так как

$$\frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{\lambda_1 \lambda_2} > 2.$$

19-6. Градиент температуры у верхней стенки меньше.

19-7. $Q = \frac{2\pi\lambda\tau(t_2 - t_1)l}{\ln \frac{d_1}{d_2}} = 200000 \text{ ккал}$.

19-8. Первая труба отдает в 1,2 раза больше теплоты.

19-9. 1030 ккал .

19-10. а) 12000 ккал ;

б) температура слоя сажи $400-200^\circ \text{C}$; железа $200-195^\circ \text{C}$; накипи $195-183^\circ \text{C}$.

20-1. $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

20-2. $0,076 \text{ мм}$.

20-3. Шары соприкоснутся, а затем установятся на расстоянии $3,1 \text{ см}$.

20-4. $2,2 \text{ ГГС}$.

20-5. $1,6 \frac{2}{\text{см}^3}$.

20-6. а) Под электроном на расстоянии $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; б) $2,3 \text{ см}$.

20-7. Расстояние от заряда q_1 равно

$$x = l \frac{V q_1}{V q_1 \pm V q_2}.$$

Знак — соответствует разноименным зарядам, знак + — одноименным.

20-8. а) 0; б) $0, \frac{2q}{ea^2}$ или $\frac{4q}{ea^2}$ в зависимости от расположения зарядов.

20-9. $4,3 \cdot 10^{11} \frac{\text{с}}{\text{м}}$; $4,2 \cdot 10^{11} \frac{\text{с}}{\text{м}}$.

20-10. а) $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ см}$; б) 137 ГГС и 68 ГГС ;

в) $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ дин}$ и $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ дин}$, $10^{-14} \text{ дин} \cdot \text{см}$ и нуль.

20-11. а) $2 \cdot 10^{-7} \text{ дин}$; б) $1,3 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$; в) $510 \frac{\text{кал}}{2}$.

20-12. Диполь A : $-\frac{p^2}{r^3}$; диполь B : $-\frac{2p^2}{r^3}$; на всю систему: $+\frac{3p^2}{r^3}$.

Сумма всех вращающих моментов равна нулю.

20-13. $5,9 \cdot 10^4$ К.

20-14. 10^{-10} н.

20-15. а) Индукция останется без изменения, а напряженность уменьшится в 2 раза;

б) индукция увеличится в два раза, а напряженность останется без изменения.

20-16. а) $1,33 \cdot 10^{-7}$ К; б) $3,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{К}}{\text{м}^2}$ (рационализиров.).

20-17. Не изменится.

20-18. $3,4 \cdot 10^{-3}$ Дж.

20-19. $E = \frac{q}{\epsilon R R_0} = 0,2$ СГС ед. напряженности.

20-20. а) 0; б) $E = \frac{qh}{\epsilon \sqrt{(R^2+h^2)^3}} = 0,36$ СГС ед. напряженности.

в) Максимальная напряженность имеет место в точке, отстоящей от кольца на расстоянии:

$$h_0 = \frac{R}{\sqrt{2}}; E_{\max} = 0,77 \text{ СГС ед. напряженности.}$$

20-21. а) Исходим из решения предыдущей задачи. Разделяем пластинку на ряд бесконечно тонких колец (рис. 15). Заряд на кольцо с радиусом x равен:

$$q = \sigma \cdot 2\pi x \cdot dx.$$

Тогда

$$dE = \frac{2\pi\sigma x dx}{\epsilon (x^2+b^2)^{3/2}};$$

$$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\frac{a^2}{b^2}}} \right) = 12,57 \text{ СГС ед. напряженности;}$$

б) при $b \rightarrow 0$ второй член в скобках равен нулю и

$$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}.$$

Если $a \ll b$, то

$$\frac{1}{\sqrt{1+\frac{a^2}{b^2}}} \approx 1 - \frac{a^2}{2b^2}.$$

При этом

$$E = \frac{q}{\epsilon b^2}.$$

20-22. Решение легко получается как следствие решения задачи 20-21

$$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon \sqrt{1+\frac{a^2}{b^2}}}.$$

20-23. Разбиваем полусферу на ряд бесконечно узких колец (рис. 16). Площадь каждого кольца $2\pi R dh$. Заряд на кольцо $\sigma 2\pi R dh$. Из

соображений симметрии ясно, что поле направлено по линии OA . Поэтому напряженность поля, создаваемая зарядом на кольце, равна

$$dE = \frac{\sigma \cdot 2\pi R \cdot dh}{\epsilon R^2} \cdot \frac{R-h}{R}.$$

Отсюда

$$E = \frac{\pi\sigma}{\epsilon}.$$

20-24. а) $2 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$; б) $-7,2 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

20-25. а) 0; б) 0,75 СГС; в) 2,51 СГС.

20-26. $E = 2,6$ СГС ед. напряженности.

21-2. а) Нет, так как направление поля во всех точках вполне определено.

б) Нет.

21-5. а) 2,8 эв; б) $3,5 \cdot 10^{-2}$ эв; в) 0,434 эв; г) 18 эв.

21-6. 40 электронов.

21-7. $1,6 \cdot 10^{-17}$ К.

21-8. $F = \frac{U^2 \epsilon S}{8\pi d^2} = 25 \text{ дин} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ н.}$

21-9. а) При постоянстве напряжения между пластинами;

б) при постоянстве зарядов.

21-11. а) 4 эрг; б) 0; в) 0 и 6,7 эрг.

21-12. а) $2,5 \cdot 10^{-6}$ Дж; б) нуль.

21-13. а) $U = \frac{q}{\epsilon \sqrt{R^2+h^2}}$; б) $E = \frac{qh}{\epsilon \sqrt{(R^2+h^2)^3}}$;

в) $U_1 = 10$ СГС ед. потенциала; $U_2 = 4,47$ СГС ед. потенциала.

21-14. $U = 2\pi\sigma(\sqrt{a^2+b^2}-b)\epsilon^{-1}$.

21-15. а) $\frac{q}{\epsilon R}$; б) $\frac{q}{\epsilon R}$; в) $\frac{q}{\epsilon(R+a)}$.

21-17. -3000 в; -3600 в.

21-18. а) $\gamma = \frac{\epsilon U}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 0,623$ ед. заряда СГС;

б) $\sigma_1 = 0,033$ СГС; $\sigma_2 = 0,0099$ СГС;

в) $E = \frac{U}{R \ln \frac{R_2}{R_1}}$; $125 \frac{\text{В}}{\text{см}}$; $57,5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$; $37,4 \frac{\text{В}}{\text{см}}$.

21-19. $10^{17} \frac{\text{СМ}}{\text{сек}^2}$; $5 \cdot 10^8 \frac{\text{СМ}}{\text{сек}^2}$.

21-20. Пробьется лишь после введения стеклянной пластинки, так как в этом случае напряженность в воздухе будет $31,4 \frac{\text{КВ}}{\text{СМ}}$, а после пробития воздуха напряженность в стекле будет $130 \frac{\text{КВ}}{\text{СМ}}$.

21-21. Напряженность в слое диэлектрика в цилиндрическом конденсаторе наиболее велика у внутренней его поверхности. При достижении напря-

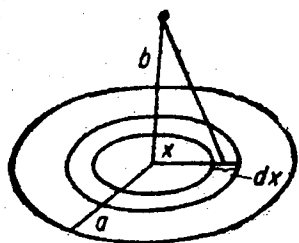


Рис. 15.

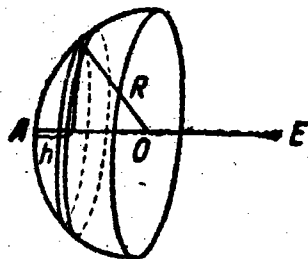


Рис. 16.

жения, соответствующего пробой в данном диэлектрике, мы имеем условия:

$$\frac{2r_1}{r_1 \epsilon_1} = E_1; \quad \frac{2r_1}{r_2 \epsilon_2} = E_2,$$

где r_1 и r_2 — внутренние радиусы диэлектрических цилиндров. Отсюда

$$E_1 r_1 \epsilon_1 = E_2 r_2 \epsilon_2.$$

21-22. а) Из соотношения между наибольшими напряженностями в изолирующих слоях

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\epsilon_1 r_1}{\epsilon_2 r_2}$$

следует, что при повышении напряжения на конденсаторе будет пробит сперва бумажный, а затем стеклянный слой. Исходя из этого, можно подсчитать, что пробой произойдет при напряжении 45 кВ; б) в этом случае тоже сперва будет пробит бумажный слой при напряжении 48 кВ.

$$21-23. \text{ а) } E = \frac{2U}{l \cdot \ln \frac{l-r}{r}} = 40 \frac{\text{В}}{\text{см}};$$

б) складывая векторно, имеем:

$$E = \frac{Ul}{2R_1 R_2 \ln \frac{l-r}{r}} = 3 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

$$21-24. \Delta U = \frac{\pi \rho d^2}{2\epsilon} = 79 \text{ В}.$$

$$21-26. U = 2U_0 \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

$$21-27. v = \sqrt{\frac{eUb}{dms} \left(\frac{b}{2} + l \right)} = 1,58 \cdot 10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

$$21-28. U_2 = \frac{2d^2 U_1}{b^2} = 400 \text{ В}.$$

21-29. Под действием поля в конденсаторе электрон сместился на $s = \frac{eUb^2}{2dmv_0^2}$; работа сил электрического поля равна $\frac{eU}{d} s = \frac{e^2 U^2 b^2}{2d^2 m v_0^2}$. Она

равна разности энергий электрона $\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$; эту разность можно принять ввиду незначительности прироста $v - v_0$ равной $(v - v_0)v_0$. Отсюда

$$v - v_0 = \frac{e^2 U^2 b^2}{2d^2 m^2 v_0^3} = 5,6 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

22-1. а) Одна и та же разность потенциалов, равная $\frac{U}{3}$. Нет. Одна и та же напряженность, равная $\frac{U}{d}$;

б) между А и С и между В и D разность потенциалов $\frac{U}{3}$.

Между С и D разность потенциалов равна нулю. На пластинках С и D отрицательный и положительный заряды такой же величины, как и на пла-

стинках А и В. Напряженность поля между А и С и между В и D равна $\frac{U}{d}$, между С и D равна нулю;

в) разность потенциалов и напряженность между А и С и между В и D равны $\frac{U}{9}$ и $\frac{U}{3d}$, между С и D эти величины равны соответственно $-\frac{2U}{9}$ и $\frac{2U}{3d}$;

г) а) ответы прежние; б) между А и С и между D и В разность потенциалов равна $\frac{U}{2}$; между С и D равна нулю. Напряженность поля между А и С и между D и В равна $\frac{3U}{2d}$; между С и D равна нулю; в) разность потенциалов и напряженность поля между С и D равны $-\frac{U}{3}$ и $-\frac{U}{d}$.

22-2. а) Наведенные заряды остаются без изменения; б) увеличиваются в 2 раза.

22-3. а) Силы, действующие на заряды, никак не изменяются; не меняется и напряженность поля во всех точках пространства;

б) напряженность поля между оболочками равна нулю. Напряженность поля в остальном пространстве и силы остаются прежними.

22-4. Расположение силовых линий в случае шарика и стены, отведенной к земле, таково же, как и в случае двух разноименных шариков, находящихся на удвоенном расстоянии (рис. 17).

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon' (2a)^2} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ н}.$$

22-5. Это следует из результата предыдущей задачи.

$$22-6. \text{ а) } F = \frac{q_1^2 - q_2^2}{4\pi\epsilon' (d_1 - d_2)^2} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ н}.$$

$$22-7. E = \frac{2qh}{\epsilon \sqrt{(h^2 + s^2)^3}} = 114 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

$$22-8. \text{ а) } \sigma = -\frac{q}{2\pi a^2} = -0,088 \text{ СГС};$$

б) на основании таких же соображений $\sigma = -\frac{qa}{2\pi r^2} = -0,019 \text{ СГС};$

в) рассмотрим (рис. 18) бесконечно узкое кольцо с радиусом b . Его площадь $dS = 2\pi b \cdot db$. Заряд на нем равен

$$dq = \sigma dS = -\frac{q \cdot ab \cdot db}{\sqrt{(a^2 + b^2)^3}}.$$

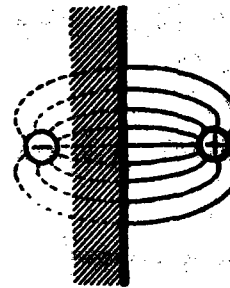


Рис. 17.

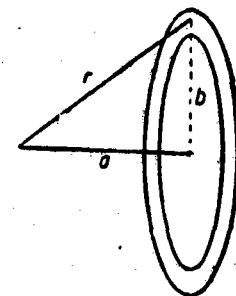


Рис. 18.

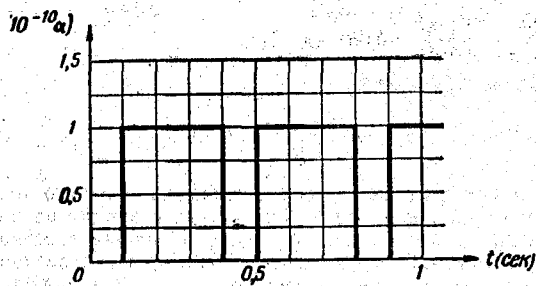


Рис. 19.

Полный заряд на всей стенке

$$q' = -\frac{qa}{2} \int_0^{\infty} \frac{2b \cdot db}{\sqrt{(a^2 + b^2)^3}} = -q = -5 \text{ СГС ед. заряда.}$$

22-9. Пылинки, заряженные положительно, и пылинки незаряженные будут при всех условиях двигаться к проволоке. Пылинки, заряженные отрицательно, будут двигаться к трубе, если они находятся вдали от проволоки, и к проволоке, если они находятся ближе определенного расстояния.

22-10. Работа производится за счет энергии руки при переносе заряда от более низкого потенциала к более высокому. Поэтому при первых переносах, пока потенциалы близки, работа мала.

22-11. См. рисунок 19.

22-12. Расстояние между противоположными точками цилиндров вблизи точки наименьшего расстояния ($x=y=0$) равно

$$l = \Delta + \frac{x^2 + y^2}{2R},$$

электрическое поле $E = \frac{V}{l}$, поверхностная плотность силы $f = \frac{E^2}{8\pi}$ (использована система СГС). Сила взаимодействия притяжения цилиндров

$$F = 2\pi \int_0^{\infty} r f dr = \frac{V^2}{4} \int_0^{\infty} \frac{r dr}{l^2} = \frac{V^2 R}{4\Delta} = 12,5 \text{ дин.}$$

23-1. $k=0,48$ ед. СГС или $k'=5,3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{К}}{\text{м} \cdot \text{В}}$.

23-2. $1,06 \cdot 10^{-8} \frac{\text{К}}{\text{СМ}^2}$.

23-3. а) $78^\circ 46'$; б) $131 \frac{\text{В}}{\text{СМ}}$; в) $0,034$ ед. СГС.

23-4. а) Условие равенства индукции в воздухе и в керосине дает

$$\left(\frac{a}{h^2} - 2\pi\sigma_1 \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \left(\frac{q}{h^2} + 2\pi\sigma_1 \right),$$

здесь ε_0 и ε — электрические проницаемости воздуха и керосина. Отсюда

$$\sigma_1 = \frac{q}{2\pi h^2} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} = 0,29 \text{ ед. СГС;}$$

б) $\sigma_1 = \frac{qh}{2\pi r^2} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} = 0,064 \text{ ед. СГС;}$

в) см. ответ к задаче 22-8:

$$q_1 = q \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} = 17 \text{ ед. СГС.}$$

23-6. Результирующая сила, действующая на верхнюю пластинку, равна сумме притяжения находящегося на ней заряда к заряду на нижней пластинке, которая имела бы место, если бы также и нижняя пластинка находилась в воздухе, и притяжения к фиктивному заряду на поверхности жидкости, плотность которого равна, как это видно из решения задачи 23-4,

$$\sigma_1 = \frac{q}{S} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Итак,

$$F_1 = q \left(\frac{2\pi q}{\varepsilon_1 S} + \frac{2\pi\sigma_1}{\varepsilon_1} \right) = \frac{4\pi q^2}{S} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} = 11300 \text{ дин.}$$

Аналогично вычисляется сила, действующая на нижнюю пластинку:

$$F_2 = \frac{4\pi q^2}{S} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} = 1300 \text{ дин.}$$

Сила, действующая на поверхность жидкости, равна

$$F_3 = \frac{4\pi q^2}{S} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) = 10000 \text{ дин.}$$

24-2. 15 в.

24-4. $3,5 \cdot 10^{-9} \phi$.

24-5. Емкость системы двух соприкасающихся шаров, очевидно, меньше суммы емкостей двух изолированных шаров. При удалении шаров емкость большего увеличивается на меньшую величину. Поэтому потенциал большего уменьшается на меньшую величину.

24-6. 670 см.

24-7. 350 см.

24-8. Увеличилась на 12,5%.

24-9. Увеличивается почти вдвое.

24-10. $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ а.}$

24-11. $9 \cdot 10^{-9} \text{ К.}$

24-12. а) $C = \frac{\varepsilon_0 d (2l - d)}{8(l - d)} = 0,257 \text{ см;}$ б) $C = \frac{\varepsilon_0 d (4l - d)}{4(2l - d)} = 0,51 \text{ см.}$

24-13. а) 7500 в; 4500 в; б) 2,25 мкК.

24-14. 40 см.

24-15. 3500 в.

24-16. Да.

24-17. а) $C = \frac{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}$; $C' = \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3} + \frac{C_2 C_4}{C_2 + C_4}$.

б) Положим, $C_3 = kC_1$; $C_4 = kC_2$;

$$C = \frac{(C_1 + C_2)^2 k}{(C_1 + C_2)(1 + k)} = \frac{(C_1 + C_2) k}{1 + k};$$

$$C' = \frac{kC_1^2}{C_1(1 + k)} + \frac{kC_2^2}{C_2(1 + k)} = \frac{(C_1 + C_2) k}{1 + k} = C.$$

$$24-18. C = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 S}{4\pi (\epsilon_2 d_1 + 2\epsilon_1 d_2)} = 516 \text{ пФ.}$$

$$24-19. C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 l}{2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} = 1070 \text{ см; } C_2 = 1100 \text{ см.}$$

24-20. а) 0,05 мкФ; б) увеличится в 1,75 раза.

24-21. 0,14 кал.

24-22. а) При одинаковых конденсаторах перетекания зарядов не происходит и энергия системы остается без изменения.

Это можно показать еще так: при переводе из последовательного соединения в параллельное напряжение уменьшается в n раз, а емкость увеличивается в n^2 раз. Следовательно, энергия остается без изменения.

В случае различной емкости конденсаторов при переключении происходит перетекание зарядов, т. е. частичный разряд. Энергия системы, а также работа разряда батареи уменьшается.

б) Энергия системы остается без изменения. Однако если соединить крайние обкладки конденсаторов батареи, то произойдет лишь частичный разряд батареи, так как средние конденсаторы останутся частично заряженными.

24-23. Если при замыкании ключа K происходит перетекание зарядов, то энергия системы уменьшается; отсюда следует, что емкость ее увеличилась. Если перетекания нет, то емкость остается без изменения.

$$24-24. A = \frac{\epsilon S U^2 (\epsilon - \epsilon_0)}{8\pi d \epsilon_0} = 279 \text{ эрг.}$$

24-25. 119 эрг.

24-26. а) Изменение энергии положительно и совершается за счет механической работы при раздвигании или при вытаскивании изолятора.

б) Изменение энергии отрицательно. Производится положительная механическая работа и удвоенная отрицательная работа в источнике тока.

$$24-30. A = \frac{C_1 C_2 U^2 (C_1 - C_2)^2}{2 (C_1 + C_2)^3} = 4,7 \text{ мДж.}$$

$$24-31. A = \frac{C U^2 (\epsilon - \epsilon_0)^2}{2 \epsilon (\epsilon + \epsilon_0)} = 600 \text{ эрг.}$$

$$24-32. A = \frac{1}{2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (U_1 - U_2)^2 = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

$$24-33. \text{ а) } M = \frac{C_1^2 U^2 (C_1 - C_2)}{2 C^2 \pi}; 48 \text{ дин}\cdot\text{см; } 180 \text{ дин}\cdot\text{см; } 59\,000 \text{ дин}\cdot\text{см.}$$

$$\text{ б) } M = \frac{(C_1 - C_2) U^2}{2\pi} = 48 \text{ дин}\cdot\text{см при любом угле } \alpha.$$

24-34. Емкость батареи до и после пробития:

$$\frac{C}{n} \text{ и } \frac{C}{n-1}.$$

Энергия

$$\frac{C U^2}{2n} \text{ и } \frac{C U^2}{2(n-1)}.$$

Изменение энергии

$$\text{ а) } \Delta A = \frac{C U^2}{2} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) = \frac{C U^2}{2n(n-1)} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж;}$$

$$\text{ б) } A_1 = \frac{C U^2}{2n(n-1)} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж;}$$

$$\text{ в) } A_2 = \frac{C U^2}{n(n-1)} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

$$24-35. 9,4 \cdot 10^{14} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}.$$

$$24-36. \text{ а) Нуль; б) } 0,28 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}.$$

24-37. а) Напряженность поля внутри шара на расстоянии r от центра равна

$$E_1 = \frac{q r}{\epsilon_0 R^3},$$

энергия

$$\mathcal{E}_1 = \int_0^R \frac{E^2 \epsilon_0}{8\pi} 4\pi r^2 dr = \frac{q^2}{10 \epsilon_0 R}.$$

б) напряженность поля вне шара на расстоянии r

$$E_2 = \frac{q^2}{\epsilon_0 r^2};$$

отсюда

$$\mathcal{E}_2 = \frac{q^2}{\epsilon_0 2R};$$

$$\text{ в) } \mathcal{E} = \frac{3}{5} \frac{q^2}{R \epsilon_0};$$

$$\text{ г) } \Delta \mathcal{E} = 0,222 \frac{q^2}{R \epsilon_0}.$$

25-1. а) 15 к; б) 0,26 к.

25-2. 44 000 $\frac{\text{а}}{\text{см}^2}$.

25-3. $3,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{а}}{\text{см}^2}$ и $0,19 \frac{\text{а}}{\text{см}^2}$.

25-4. 2,5 м.

25-5. 57 ом.

$$25-6. R = \frac{\rho}{2\pi d} = 160 \text{ ом.}$$

25-7. Нет.

25-8. а) В вольфрамовом волоске ток при включении значительно больше, чем после. В угольном — наоборот;

б) плотность тока в вольфрамовом волоске в середине меньше, чем по краям, в угольном — наоборот.

25-9. 44° С.

25-10. 0,0049 град⁻¹.

25-11. Угольный стержень должен быть в 44 раза короче.

25-12. Для того чтобы температура не влияла на показания вольтметра, необходимо, чтобы ток, от которого зависит вращающий момент рабочей катушки, изменялся пропорционально изменению упругости пружинки. Температурный коэффициент манганинового сопротивления и сопротивления катушек равен

$$\alpha = \alpha_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Компенсация получится при условии $\frac{1}{1+\alpha t} = 1+\beta t$, что ввиду малости β может быть заменено соотношением $\alpha = -\beta$, откуда

$$\alpha_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -\beta; R_2 = 9R_1.$$

25-13. а) 45 в и 15 в; б) 20 в и 40 в; в) 60 в и 0.

24-14. $U = j_0 \rho d \rho \omega = 6,4$ в.

25-15. $R_x = R \frac{(U_0 - U_2) U_1}{(U_0 - U_1) U_2} = 78\,600$ ом.

25-16. 77 ма.

25-17. 4,1 в и 0,05 ом.

25-18. а) -2 в; знак минус указывает, что источник тока включен встречно; б) 3,2 в.

25-19. 0,47 а.

25-20. а) $E_1 > 2E_2$; б) $E_1 = 2E_2$; в) $E_1 < 2E_2$.

25-21. Стрелка первого вольтметра отклонится вправо и покажет 1,75 в; стрелка второго вольтметра отклонится влево и покажет 1,5 в.

25-22. а) Нуль; б) нуль; в) разность потенциалов между проводами через нечетное число элементов равна E_1 , через четное — нулю.

25-23. $q = I \rho e' = 1,8 \cdot 10^{-10}$ к.

25-24. На границах слоя электролита образуются действительные заряды, изменяющие поле.

25-26. Силовые линии следуют всем изгибам трубки или провода. Это вызывается наличием действительных зарядов на стенках трубки (или на изоляции провода).

25-27. а) $0,013 \frac{а}{см^2}$; б) $0,0057 \frac{а}{см^2}$; в) 4,1 а.

25-28. а) Это явствует из следующего рассуждения. На основании закона Ома (который можно применять ввиду малости получающихся при этом плотностей тока) в слоях диэлектрика получаются напряженности E_1 и E_2 ,

отношение которых $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ отлично от отношения напряженностей в

слоистом конденсаторе $\frac{E_1'}{E_2'} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, если $\frac{\rho_1}{\rho_2} \neq \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$.

Вследствие этого равновесное состояние установится только тогда, когда на границах диэлектриков будут находиться такие заряды, при которых имеет место соотношение

$$\frac{E_1'}{E_2'} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Очевидно, что при наличии проводимости и при условии $\frac{\rho_1}{\rho_2} \neq \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ емкость конденсатора больше, чем при отсутствии проводимости;

б) величину этих зарядов можно подсчитать так. Если U — полное напряжение на конденсаторе, то по закону Ома

$$E_1 = \frac{U \rho_1}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}; E_2 = \frac{U \rho_2}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}.$$

С другой стороны, при равновесии

$$E_1 = \frac{4\pi \sigma_1}{\epsilon_1} \text{ и } E_2 = \frac{4\pi \sigma_2}{\epsilon_2},$$

где σ_1 и σ_2 — плотности действительных зарядов на границе диэлектриков;

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1}{4\pi} (\epsilon_1 E_1 - \epsilon_2 E_2) = \frac{U}{4\pi} \cdot \frac{\rho_1 \epsilon_1 - \rho_2 \epsilon_2}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2} = 22 \text{ ед. СГС};$$

в) при разряде внешние заряды на обкладках конденсаторов перемещаются так, что на обкладках остаются одноименные заряды, в сумме равные σS (но не равные, вообще говоря, между собой). Получаются как бы два последовательно соединенных конденсатора, заряженных в противоположных направлениях, так что их противоположные обкладки (т. е. обкладки слоистого конденсатора) находятся при одном потенциале. Так как один из конденсаторов разряжается скорее другого, то появляется разность потенциалов между обкладками слоистого конденсатора и возможен разряд.

$$25-29. t = CR \ln \frac{E}{E-U} = 0,046 \text{ сек.}$$

$$25-30. \rho = \frac{4\pi t}{s \ln \frac{q_0}{q}} = 1,47 \cdot 10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см.}$$

26-1. 1,3 ом.

26-2. а) 0,75 ом; б) 1 ом.

$$26-3. \text{ а) } R_1 = r \sqrt{3}; \text{ б) } R_2 = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

26-4. 261 ом.

26-5. а) +0,1%; б) +11%.

25-6. а) -0,3%; б) -30%.

$$26-7. R = \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_2 - U_1}{I_1} = 25,6 \text{ ом.}$$

26-8. 0,025 а.

26-9. а) 1 а; б) 3,73.

26-10. $x = 6,40$ км.

$$26-11. \text{ а) } \gamma \frac{(a+b) \sqrt{a^2+b^2}}{a+b+2\sqrt{a^2+b^2}}; \text{ б) } \gamma \frac{2ab+(a+b) \sqrt{a^2+b^2}}{a+b+2\sqrt{a^2+b^2}}.$$

$$26-12. I = \frac{UR_1}{R_2 R_1 + R(R_2 + R_1)} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ а.}$$

$$26-13. R_1 = \frac{R(U - U_1 - U_2)}{U_2} = 204\,000 \text{ ом};$$

$$R_2 = \frac{R(U - U_1 - U_2)}{U_1} = 255\,000 \text{ ом.}$$

26-14. а) 108 в и 72 в; б) 99 в и 81 в; в) 4000 ом и 6000 ом.

$$26-15. U_1 = U \frac{xrl}{Rxl + r^2 - Rx^2};$$

$$\text{ а) } U_1 = 0; \text{ б) } U_1 = U; \text{ в) } U_1 = U \frac{2r}{R+4r} < \frac{1}{2} U;$$

г) U_1 пропорционально x .

26-16. 1,58 а и 3,65 а.

$$26-17. \frac{1}{3} \text{ а}; \frac{2}{3} \text{ а}; 1 \text{ а.}$$

26-18. а) $U_1 = 0,27$ в; $U_2 = 1,27$ в; $U_3 = -2,23$ в; б) 0,73 в.

26-19. 0,5 ом; 0,33 ом; 0,5 ом.

26-20. $I_1 = 1,5$ а; $I_2 = 2,5$ а; $I_3 = 4$ а.

26-21. Без вычислений видно, что $I_4=0$, так как R_4 закорочено. Приняв это во внимание, находим $I_1=0,4$ ма, $I_2=0,7$ ма, $I_3=1,1$ ма.

$$26-22. \Delta t = \frac{RU}{R_{ve}} = 3,2^\circ \text{C}.$$

$$26-23. n_1=2; n_2=200.$$

$$26-24. \text{ а) } I_1 = \frac{E_1 r_2 + R(E_1 - E_2)}{r_1 r_2 + R(r_1 + r_2)}; I_2 = \frac{E_2 r_1 + R(E_2 - E_1)}{r_1 r_2 + R(r_1 + r_2)};$$

$$I = \frac{E_2 r_1 + E_1 r_2}{r_1 r_2 + R(r_1 + r_2)};$$

$$\text{ б) } r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; E = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 + r_2};$$

$$\text{ в) } I_1 = \frac{E_1}{r_1}; I_2 = \frac{E_2}{r_2};$$

т. е. токи таковы же, как и при коротком замыкании отдельных элементов; г) второй элемент не дает тока! 1) если $r \rightarrow \infty$. В этом случае первый элемент дает ток

$$I_1 = \frac{E_1}{r_1 + R} = I;$$

$$2) \text{ если } E_2 = \frac{E_1}{r_1 + R} \cdot R.$$

Это значит, что E_2 равно напряжению во внешней цепи.

$$\text{ д) } R = \frac{E_1 r_2 - E_2 r_1}{2(E_2 - E_1)}.$$

Возможно в следующих случаях: 1) при $\frac{E_1}{r_1} = \frac{E_2}{r_2}$; 2) при $\frac{E_1}{r_1} \approx \frac{E_2}{r_2}$ и $E_2 \approx E_1$.

26-25. В случае б) показание амперметра уменьшается, в случае в) увеличивается.

26-26. Используем симметрию задачи. Обозначим потенциалы точек $A_0, A_1, A_2, a_0, a_1, a_2$ и соответственно b_0, b_1, b_2 . Если $a_0 = -b_0$, то $a_1 = -b_1$ и $a_2 = -b_2$. Составляем два уравнения баланса токов в точках A_1 и A_2 для определения двух неизвестных величин a_1 и a_2 , полагая $a_0 = -b_0 = \frac{1}{2}b$. На-

ходим суммарный ток $\frac{11}{15}a$, т. е. сопротивление равно $\frac{15}{11} \text{ ом}$.

$$27-2. 23.$$

$$27-3. 54 \text{ м}.$$

$$27-5. \text{ а) } I = \frac{nE \mp \sqrt{n^2 E^2 - 4Pnr}}{2rn}; I_1 = 2 \frac{2}{3} a; I_2 = 2a;$$

$$\text{ б) } P_{\max} = \frac{nE^2}{4r} = 8 \frac{1}{6} \text{ вт}.$$

$$27-7. A = \frac{1}{3} rR(I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2) = 2480 \text{ дж}.$$

$$27-8. \text{ а) } +2 \text{ дж}; +2 \text{ дж};$$

$$\text{ б) } +2 \text{ дж}; +0,7 \text{ дж}; \text{ в) } -2 \text{ дж}; +0,6 \text{ дж}.$$

$$27-9. \text{ а) } \eta = \eta_0 \frac{E(I_1 + I_2) - UI_2}{UI_1} = 64\%; \text{ б) } 67\%.$$

$$27-10. \text{ а) } Q_1 = \frac{q^2 R}{\tau} = 54 \text{ кал} = 2,4 \cdot 10^2 \text{ дж};$$

$$\text{ б) } Q_2 = \frac{4q^2 R}{3\tau} = 72 \text{ кал} = 3,0 \cdot 10^2 \text{ дж};$$

$$\text{ в) } Q_3 = \frac{\ln 2 \cdot q^2 \cdot R}{2\tau} = 19 \text{ кал} \approx 79 \text{ дж}.$$

$$27-11. 7 \text{ мин}.$$

$$27-12. 133.$$

$$27-13. \text{ а) } 30 \text{ мин}; \text{ б) } 6 \text{ мин } 40 \text{ сек}.$$

27-14. На основании указанного в задаче предположения можно написать

$$\frac{U_1^2}{R} \tau_1 - k\tau_1 = \frac{U_2^2}{R} \tau_2 - k\tau_2 = \frac{U_3^2}{R} \tau_3 - k\tau_3,$$

откуда

$$\tau_3 = \tau_1 \tau_2 \frac{U_1^2 - U_2^2}{U_3^2(\tau_2 - \tau_1) + U_1^2 \tau_1 - U_2^2 \tau_2} = 44 \text{ мин}.$$

$$27-15. \text{ а) } R_1 R_2 = r^2; \text{ б) } R_1 R_2 > r^2.$$

$$27-16. Q = \frac{R}{2\pi d} \rho \tau \ln \frac{R}{r} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ кал}.$$

$$27-17. \text{ а) } \tau = \frac{Dl^2 c \rho_0 (1 + 0,5at)}{U^2} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек},$$

где $\rho_0(1 + 0,5at)$ — среднее удельное сопротивление свинца при изменении его температуры от 0°C до точки плавления t ; D и c — плотность и теплоемкость свинца;

$$\text{ б) } \tau = \frac{\pi^2 d^4 D c \ln(1 + at)}{16 I^2 \rho a} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ сек}.$$

27-18. Предельный ток для данного предохранителя определяется условием, чтобы температура при установившемся режиме равнялась температуре плавления. Количество теплоты, теряемое проволокой за 1 сек, равно

$$Q = S \cdot f(t),$$

где функция $f(t)$ учитывает зависимость потери теплоты от температуры. При установившемся состоянии для первой проволоки

$$\frac{I_1^2 \rho (1 + at) l \cdot 4}{\pi d_1^2} = \pi l d_1 \cdot f(t);$$

для второй проволоки

$$\frac{I_2^2 \rho (1 + at) l \cdot 4}{\pi d_2^2} = \pi l d_2 \cdot f(t).$$

Отсюда

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{d_1^3}{d_2^3}; I_2 = I_1 \sqrt{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3} = 23a.$$

27-19. Вследствие одинаковости температуры накала волосков боковые поверхности волосков должны быть пропорциональны мощности ламп. Отсюда получаем:

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{\frac{P_2 U_1^2}{P_1 U_2^2}} = 0,0131 \text{ мм}; I_2 = I_1 \sqrt[3]{\frac{P_2 U_2^2}{P_1 U_1^2}} = 614 \text{ мм}.$$

27-20. 4 а; 0,55 а.

27-21. При установившемся состоянии количество теплоты, выделяемое током за 1 сек, равно количеству теплоты, рассеиваемой в воздух:

$$I^2 R = kS(t_1 - t_0),$$

где k — коэффициент теплоотдачи.

Далее

$$\Delta l = l_0 \alpha (t_1 - t_0),$$

где α — коэффициент расширения.

Отсюда

$$I^2 R = \frac{kS \Delta l}{l_0 \alpha}; \quad \frac{\Delta l}{l_0} = k_1 I^2,$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, равный

$$k_1 = \frac{4\alpha\rho}{\pi^2 d^3 k},$$

обратно пропорционален кубу диаметра проволоки.

27-22. По участку EC течет ток I_1 , прямо пропорциональный напряжению U ; $I_1 = k_1 U$. По участку AC течет ток $I_2 = k_2 I$ (пропорциональный нагрузочному току) минус ток $\frac{I_1}{2}$, т. е. $I_2 = \frac{I_1}{2}$. По участку CB течет ток $I_2 + \frac{I_1}{2}$.

Удлинение участка AC равно $c \left(I_2 = \frac{I_1}{2} \right)^2$, где c — коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров и материала проволоки (см. предыдущую задачу). Удлинение участка CB равно $c \left(I_2 + \frac{I_1}{2} \right)^2$. Разность удлинений, обуславливающая поворот стрелки, равна

$$2c I_1 I_2 = 2ck_1 k_2 I U = kP.$$

28-1. $I = \frac{Ne v}{l}$, где N — общее число свободных электронов в проводе;

v — скорость их упорядоченного движения. Отсюда

$$p = \frac{I l m}{e} = 2,3 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

28-2. а) 240 лет; б) 9,8 км.

28-3. $2,8 \cdot 10^{-11}$ а.

28-4. $1,1 \cdot 10^{-10}$ к.

28-5. Наибольшая (теоретически) работа термопары равна:

$$A = Q \frac{T_1 - T_2}{T_2}.$$

Количество электричества равно:

$$q = \frac{A}{E} = \frac{Q(T_1 - T_2)}{E T_1} = 1480 \text{ мк}.$$

28-7. При приближении положительного заряда по направлению к нему движутся электроны, испускаемые накалившимся волоском. Осаждая на стенки колбы, они создают внутри стенки колбы поле, уничтожающее внешнее поле, и волосок остается в покое. По удалении положительного заряда волосок притягивается к отрицательному заряду на стенке колбы.

При слабом накале волосок испускает слишком мало электронов.

При сильном накале электроны, летящие от одного из электродов к другому, ионизируют остатки газа. Благодаря наличию ионов внутренний объем колбы обрабатывается в проводник, поэтому электрическое поле внутри него отсутствует.

28-8. 3,1 аа.

28-9. 0,15 а.

28-10. 0,12 а.

$$29-1. v \geq 2 \sqrt{\frac{\varphi e}{m}} = 1,28 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

29-2. а) $U \geq 13,56$ а;

б) $U \geq \varphi(n+1) = 67,8$ а.

29-3. Сначала полоска притягивается, потому что на ней вследствие электризации через влияние образуется заряд, по знаку противоположный заряду на острие. Затем, когда напряженность поля вблизи острия достигает такого значения, что энергия ионов, соответствующая работе электрических сил на длине свободного пробега, оказывается достаточной для ионизации молекул воздуха, возникает ионный «ветер», полоска заряжается тем же знаком, как и острие, а потому отталкивается.

29-4. Если ω — угловая скорость вращения ионов; m_1 и m_2 — массы их; x — расстояние от первого иона до центра инерции системы, то энергии ионов равны

$$\frac{1}{2} m_1 \omega^2 x^2 \text{ и } \frac{1}{2} m_2 \omega^2 (b-x)^2.$$

По условию

$$\frac{1}{2} m_1 \omega^2 x^2 + \frac{1}{2} m_2 \omega^2 (b-x)^2 = \frac{3}{2} kT.$$

Центростремительные силы равны:

$$m_1 \omega^2 x = m_2 \omega^2 (b-x) = \frac{e^2}{\epsilon_0 b^2},$$

где e — заряд иона. Отсюда

$$b = \frac{e^2}{3kT\epsilon_0} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ см},$$

где ϵ_0 — электрическая проницаемость вакуума.

29-5. $3,4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$.

29-6. $4,78 \frac{\text{мкА}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$.

29-7. $2,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$.

29-8. 17 000 раз.

29-9. а) Над океаном $n = 790 \text{ см}^{-3}$; над сушей $n = 800 \text{ см}^{-3}$; б) над океаном 14 м и 19,7 м; над сушей 178 см и 248 см.

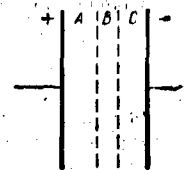
29-10. а) $t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} \right) = 62 \text{ сек}$; б) $t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{n_0}{n} = 460 \text{ сек}$.

29-11. а) Ширина зоны A , откуда все образующиеся отрицательные ионы попадают на анод, равна (рис. 20)

$$\frac{U}{d} \tau k_+ = \frac{Un}{dq} k_+;$$

ширина зоны C равна:

$$\frac{Un}{dq} k_-.$$



В средней зоне B рекомбинация имеет место.

Рис. 20.

При получении насыщения зона В исчезает и общая ширина зон А и С делается равной d.

Отсюда

$$\frac{U}{d} = \frac{qd}{n(k_+ + k_-)}.$$

Подставляя это в формулу

$$j = en(k_+ + k_-) \frac{U}{d},$$

имеем

$$j = eqd,$$

что и требовалось доказать;

$$6) U_0 = \frac{d^2 q}{n(k_+ + k_-)} = \frac{d^2 \sqrt{qa}}{k_+ + k_-} = 11 \text{ в.}$$

Этот результат неточен, потому что мы не приняли во внимание влияния пространственных зарядов и того обстоятельства, что $\tau = \frac{n}{q}$ есть лишь

средняя продолжительность существования ионов. На деле насыщение получается при более высоких напряжениях, чем следует по найденной формуле.

29-14. Результирующая сила равна нулю, так как электроны, увеличивая свою скорость, притягивают к себе анод.

30-2. 15,5 м.

30-3. 0,203 г.

30-4. $m = \frac{\mu It}{2F} = 0,045 \text{ г}$, где μ — молекулярный вес воды.

30-5. Число молекул соли в 1 см³ раствора $n = \frac{N_c}{\mu}$,

где μ — молекулярный вес; N — число Авогадро; $\alpha = 0,77$.

30-6. 0,313 (ом·см)⁻¹.

30-7. $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

30-8. а) $4,6 \cdot 10^4 \text{ н}$; б) $6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

30-9. 7000 $\frac{\text{кал}}{\text{моль}}$.

31-1. $1,42 \cdot 10^{-4} \text{ н·м}$.

31-2. а) 6000 СГС; б) 4200 СГС; в) 2000 СГС; г) нуль.

31-3. $p = I(\omega_1 S_1 + \omega_2 S_2 \cos \alpha)$,

где α — угол, образованный осями большой и малой спиралей.

31-4. 700 $\frac{\text{а}}{\text{м}}$.

31-5. Уменьшится в 2 раза.

31-6. а) Нет; б) $L = \frac{2\pi m}{e} = 5,6 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кг·м}^2}{\text{сек}}$, где m и e — масса и заряд электрона.

31-8. Если провод, по которому идет ток I_2 , расположен посередине, то решение невозможно. Если этот провод расположен с краю, то искома прямая расположена на расстоянии 1 см от среднего провода.

31-9. На расстоянии 4 см к востоку.

31-10. а) На 2,1 см ниже провода, на 5,6 см южнее;

б) 0,9 э и 0,63 э.

31-11. $0,7 \text{ э} = 56 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

31-12. $1 \text{ э} = 80 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

31-13. $H = \frac{2I \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4}}{a} = 4,8 \text{ э}$.

31-14. $H = \frac{8I \sqrt{a^2 + b^2}}{ab} = 0,34 \text{ э}$.

31-15. $H = \frac{2I}{a \sqrt{3}} = 0,019 \text{ э}$.

31-16. а) $64 \frac{\text{а}}{\text{м}}$; б) $H = \frac{IR^2}{2 \sqrt{(a^2 + R^2)^3}} = 26 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

31-17. Нулю.

31-18. а) $7000 \frac{\text{а}}{\text{м}}$; б) $3500 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

31-19. Для решения удобно воспользоваться ответом к задаче 31-16, б). Обратив внимание, что на участке длиной dx (рис. 21) величина тока равна $I \omega dx$, и приняв для упрощения вычислений

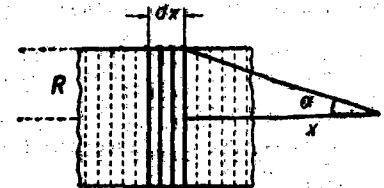


Рис. 21.

$$\frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} = \sin \alpha \text{ и } x = R \operatorname{ctg} \alpha,$$

получаем для случая а):

$$H = \frac{w_1 I}{\sqrt{1 + n^2}} = \frac{2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \cdot 1 \cdot 10^{-1} \text{ а}}{\sqrt{17}} = 485 \frac{\text{а}}{\text{м}}$$

и для случая б):

$$H = \frac{w_1 I}{\sqrt{4 + n^2}} = 450 \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

31-20. Решение легко получается из ответа к задаче 31-16 б), если принять во внимание, что $a \gg R$:

$$H = \frac{p}{2\pi \mu_0 a^2},$$

$p = 60 \text{ СГС} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$;

$$H = 7,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

31-21. $\Phi = \frac{\mu'}{2\pi} b/w \ln \frac{R_2}{R_1} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ вб}$.

31-22. Отличие от нуля циркуляции напряженности магнитного поля Земли есть доказательство существования вертикальных электрических токов в атмосфере. Для тех областей, в которых циркуляция при обходе по часовой стрелке положительна, сумма токов, текущих сверху вниз, больше суммы токов, текущих снизу вверх.

31-23. а) 8 а (рационализированных единиц циркуляции системы СИ) = 10 э·см;

б) 16 а; в) нуль.

31-24. Для доказательства надо воспользоваться теоремой о циркуляции напряженности.

31-25. а) Поле вокруг тонкой проволоки и поле вне трубы таково, как и поле при наличии тока в длинной тонкой проволоке; поле внутри трубы отсутствует; б) вне шара имеется поле, обусловленное наличием тока в проводе, подводящем ток к шару; ток, идущий от шара, магнитного поля не имеет.

$$31-26. \Phi = \frac{\mu_0 I l \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi} = 3,13 \cdot 10^{-4} \text{ вб.}$$

$$31-27. \text{ а) } H = \frac{I r}{2\pi R^2} = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{а}}{\text{м}};$$

$$\text{ б) } \Phi = \frac{\mu' I l}{4\pi} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ вб.}$$

31-28. $H = \frac{j d}{2}$. Поле в полости однородно. Вектор напряженности перпендикулярен векторам j и d .

$$31-29. \text{ а) } 5 \cdot 10^3 \frac{\text{а}}{\text{м}}; \text{ б) } 20 \frac{\text{а}}{\text{м}}; \text{ в) } \text{силовые линии не замкнуты.}$$

$$31-30. B = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha S D g}{l} = 93,5 \text{ эс} = 9,35 \cdot 10^{-3} \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}.$$

31-31. Не разорвется. Для разрыва требуется индукция:

$$B = \frac{2 S p_0}{l d} = 40\,000 \text{ эс} = 4 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}.$$

31-32. 120 н.

31-34. Вывод задачи 31-33 относится к случаю одинаковой плотности тока по всему сечению проводника. Так как это трудно осуществить в толстых проводах, следует пользоваться тонкими проводами.

$$31-35. F = \frac{6 p_1 p_2}{\mu R^4} = 0,00058 \text{ дин.}$$

31-36. Катушки стремятся расположиться так, чтобы их магнитные поля совпадали по направлению. В случае значительной разницы диаметров катушек совпадение полей имеет место только внутри неподвижной и вне подвижной катушек, а в пространстве между ними поля имеют противоположные направления. Поэтому при большой разнице диаметров сила взаимодействия заметно меньше, чем при малой разнице.

31-37. а) Угол отклонения не изменится; б) уменьшится, если размеры стрелки сравнимы с расстоянием до провода; в) не изменится.

31-38. Намагничивание при насыщении; $B = \mu' H + P$, где P — намагничивание.

31-39. Искомые значения B и H определяются точкой касания касательной, проведенной из начала координат к кривой намагничивания. В данном случае $B = 8800 \text{ эс}$; $H = 15 \text{ э}$.

$$31-40. 50 \text{ э} = 4000 \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

31-41. Сначала определяем H , затем по графику на рисунке 31-3 находим B .

$$\text{ а) } H = 20 \text{ э}; B = 13\,900 \text{ эс}; \text{ б) } H = 16 \text{ э}; B = 13\,300 \text{ эс.}$$

31-42. а) Сначала вычисляем H при силе тока 0,6 а, затем по графику на рисунке 31-3 находим B :

$$\Phi = 80\,000 \text{ мкс} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ вб};$$

$$\text{ б) } 0,75 \text{ а.}$$

$$31-43. \mu = \frac{B(l-l_1)k}{4\pi w l - \frac{B l_1}{\mu_0}} = 1400 \text{ ед. СГС,}$$

где μ_0 — проницаемость воздуха.

31-44. Определяем H в первом кольце

$$H = \frac{4\pi I_1}{d} = 8 \text{ э.}$$

По кривой на рисунке 31-3 находим $B = 11\,400 \text{ эс}$,

$$I_2 = \frac{(\pi d - d_1) H \mu_0 + B d_1}{4\pi w \mu_0} = 11 \text{ а.}$$

Здесь μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

$$31-45. \text{ а) } 1 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}; \text{ б) } 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ СИ.}$$

31-46. Правый.

$$31-48. 3,7 \cdot 10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}; 3900 \text{ эс.}$$

$$31-49. v = \frac{eB}{2\pi m} \sqrt{h^2 + 4\pi^2 R^2} = 7,6 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

31-50. Скорость электрона должна быть направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы E и B , и равна $v = \frac{E}{B} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$

$$31-51. \text{ а) } a_n = 0; a_t = \frac{eE}{m}; \text{ б) } a_t = 0; a_n = \frac{e}{m} \sqrt{B^2 v^2 + E^2}.$$

$$31-52. \text{ б) } B = \frac{\sqrt{2\mathcal{E}m}}{eR} = 4800 \text{ эс};$$

$$\text{ в) } t = \frac{\sqrt{2\mathcal{E}m}}{2eU} (\pi R + 2d) = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ сек.}$$

31-53. Сила равна нулю.

$$32-1. 1570 \text{ эрг} = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ дж.}$$

32-2. Никак.

32-3. Во втором случае больше.

32-4. За счет работы аккумулятора.

32-5. а) Одинаковое; б) в первом случае больше.

32-6. Отброс гальванометра в случае пунктирной линии больше.

32-7. По наружному контуру идет индукционный ток. В радиальных проводниках токов нет.

32-8. а) Диэлектрик поляризуется; б) в сверхпроводящем кольце образуется ток, магнитный поток которого в сумме с потоком магнита равен нулю.

$$32-9. U = \pi B l^2 n \frac{k-2}{k} = 38 \text{ мв.}$$

$$32-10. 1,4 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}.$$

$$32-11. \text{ а) } I_1 = 10^{-3} \text{ а}; I_2 = 0; I_3 = 10^{-3} \text{ а};$$

$$\text{ б) } I_1 = I_2 = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ а}; I_3 = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ а};$$

$$\text{ в) } I_1 = 0; I_2 = I_3 = 10^{-3} \text{ а.}$$

$$32-12. 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ а.}$$

32-13. Во втором случае выделяется теплоты на 14%, а в третьем случае на 2% больше, чем в первом.

$$32-14. 0,007 \text{ к.}$$

$$32-15. q = \frac{\mu_0' E S^2}{4\pi r^2 l} = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ к.}$$

$$32-16. q = \frac{B_{\text{нп}}}{4\pi D} = 0,053 \text{ к, где } D — \text{плотность меди.}$$

$$32-17. 3 \cdot 10^5 \text{ мкс} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

32-18. Увеличивается.

$$32-20. \omega = \frac{1}{\pi d} \sqrt{\frac{4\pi L}{\mu_0}} = 1200 \text{ витков.}$$

$$32-21. L = \frac{mR\mu_0}{4\pi D\rho l} = 16,5 \text{ мГн.}$$

$$32-22. \text{ а) } 1,5 \text{ мГн; б) } 5 \text{ мГн.}$$

32-23. а) Магнитные поля катушек одинаково направлены; б) противоположны; в) образуют прямой угол.

$$32-25. \text{ а) } 0,81 \text{ мГн; б) около } 350 \text{ см.}$$

$$32-26. \text{ а) } 1,9 \text{ мГн; б) } 0,23 \text{ мГн.}$$

32-27. а) Сначала определим H :

$$H = \frac{4\pi I}{d} = 20 \text{ э.}$$

Затем по кривой намагничивания (рис. 31-3) находим B и определяем L :

$$L = 3,5 \text{ Гн;}$$

$$\text{б) } 18,5 \text{ Гн.}$$

32-28. У соленоида, сердечник которого изображен справа, напряженность поля во всем сечении почти одна и та же. Поэтому индуктивность его меняется в зависимости от величины тока по тому же закону, что и μ (имеется острый максимум L).

У соленоида, сердечник которого изображен слева, напряженность поля в ближних частях значительно больше, чем в дальних. Поэтому максимум индуктивности сглажен.

$$32-29. L = \frac{4\pi\omega^2 (S_1\mu_1 + S_2\mu_2)}{l}.$$

$$32-30. L = 4\mu \ln \frac{2a-d}{d} = 2,2 \text{ мГн.}$$

$$32-31. 0,004 \text{ сек.}$$

$$32-32. \text{ Местная цепь замыкается через } 0,012 \text{ сек.}$$

$$32-33. \text{ Повысится на } 0,8^\circ.$$

32-34. а) Площадь $OABO$ равна количеству электричества, протекшего по дросселю за время $0,5 \text{ сек.}$ Площадь $OCAO$ равна $\frac{\Phi\omega}{R}$, где Φ — магнитный поток в сердечнике дросселя, ω — число витков в обмотке дросселя, R — сопротивление его обмотки;

б) обозначим площадь $OCAO$ буквой σ :

$$B = \frac{4\pi\sigma}{Sd}.$$

Сосчитав число клеток сетки на рисунке, которое заключает площадь $OCAO$, найдем, что $\sigma = 0,17 \text{ к.}$ Отсюда $B = 2300 \text{ Гс.}$

$$32-35. \text{ б) } U = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\frac{R_1 + R_2}{L}t} = 0,076 \text{ в.}$$

$$32-36. 490 \text{ в.}$$

$$32-37. 0,008 \text{ сек.}$$

$$32-38. 0,19 \text{ Дж.}$$

$$32-39. \mathcal{E} = \mu I^2 \ln \frac{R_2}{R_1} = 31300 \text{ эрг.}$$

$$32-41. 0,01 \text{ сек.}$$

$$32-42. 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

32-43. Бесконечность. Бесконечный прямой ток есть предельный случай конечного прямого тока. Полученный результат подчеркивает его неосуществимость.

$$32-44. \text{ а) } 0,07 \text{ Дж; б) бесконечность.}$$

$$32-45. t_2 = t_1 + \frac{2I^2L}{Dl\pi d^2\epsilon} = 1150^\circ \text{ С.}$$

32-46. Формула пункта 11 введения относится к случаю отсутствия гистерезиса.

32-47. а) На основании соотношения 10 введения к § 31 имеем:

$$H_A \cdot l_A + H_B \cdot l_B = 0.$$

Здесь индексы «в» и «ж» указывают, что речь идет о напряженности магнитного поля H и длине силовых линий l в воздухе (в прорезе) и в железе (в кольце). Отсюда

$$H_{\text{ж}} = -1,3 \text{ Э;}$$

$$\text{б) } -5,2 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}; \text{ в) ноль.}$$

$$33-1. 6,3 \text{ а.}$$

$$33-2. 3,2 \text{ а.}$$

$$33-3. \text{ а) } \frac{q\pi}{2l\sqrt{2}} = 15 \text{ ч; б) } \frac{q\pi}{2l} = 21 \text{ ч.}$$

33-4. а) 57 в; б) продолжительность свечения каждого из электродов составляет 38,5% от времени горения лампы.

$$33-5. k = \frac{\pi d^2 f}{U\sqrt{2}} = 1,8 \frac{\text{см}^2}{\text{сек} \cdot \text{в.}}$$

$$33-6. \text{ а) Амперметр } A_1 \text{ покажет } I_1 = 0,5 \text{ а. Амперметр } A_2 \text{ покажет } I_2 = \frac{1}{R} \sqrt{U^2 + E^2} = 1,6 \text{ а; б) } 480 \text{ кал.}$$

$$33-7. I_{\text{eff}} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}; I_{\text{med}} = \frac{I_m}{2}.$$

$$33-9. 141 \text{ в.}$$

$$33-10. \text{ а) } 6,4 \text{ мкФ; б) } 0,0064 \text{ мкФ.}$$

$$33-11. 0,055 \text{ Гн.}$$

$$33-12. f = \frac{2\sqrt{n^2 - 1}\rho l}{k\pi^2 d_1^2 d_2 \mu \omega} = 1600 \text{ Гц.}$$

$$33-13. \text{ а) } I = \frac{B\pi d_1^2 n}{\sqrt{8(R^2 + \omega^2 L^2)}}.$$

$$\text{где } R = \frac{4\rho d_1}{d_2} = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ ом; } \omega L = 3,08 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

Так как $\omega L \ll R$, то, пренебрегая $\omega^2 L^2$ по сравнению с R^2 , имеем:

$$I = \frac{\sqrt{2} B\pi d_1^2 \cdot d_2^2 n}{16\rho} = 0,072 \text{ а;}$$

$$\text{б) } I = \frac{\sqrt{2} B\pi d_1^2}{8L} = 16 \text{ а независимо от скорости вращения.}$$

33-14. В случае постоянного тока мощность в 1,2 раза больше.

33-15. а) Нет, б) да.

33-18. $I=0,5$ а; напряжение на конденсаторе 80 в, на сопротивлении 75 в.

33-19. 1,6 эи.

33-20. 0,75 а; 0,64 а; 0,4 а.

33-21. 1,7 а; 5,4 а.

33-22. а) 100 мкф; б) 25 в.

33-23. 31,7°.

33-24. 3,2 кат.

$$33-25. P_1 = \frac{U_1^2}{R} = 97 \text{ вт}; P_2 = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2R} = 105 \text{ вт}.$$

33-26. 154 вт; 312 вт.

33-27. 27 вт.

33-28. а) $U_1 = \sqrt{U^2 - I^2 L^2 \omega^2} - I R_0 = 114$ в;

б) потребляемая квартирной сетью (включая дроссель) мощность равна

$$P = \frac{U^2 (R + R_0)}{(R + R_0)^2 + L^2 \omega^2},$$

где R — сопротивление всей сети, кроме дросселя. Отсюда

$$P_{\max} = \frac{U^2}{2L\omega} = 460 \text{ вт};$$

в) при коротком замыкании $P_{\text{кор}} = 58$ вт.

33-29. а) Число клеток сетки, охватываемых петлей гистерезиса, приблизительно равно 38.

Отсюда

$$P \approx 15,2 \text{ вт};$$

б) 4,5 ом.

$$33-30. f = \frac{2}{\rho \epsilon} = 5,6 \cdot 10^8 \text{ гц}.$$

$$33-31. \rho = \frac{2}{\epsilon f} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} = 1,28 \cdot 10^9 \text{ ом} \cdot \text{см}.$$

33-32. $F = 25$ дин.

33-33. Взаимодействуют с силой, меняющейся по закону синуса с частотой 3 гц.

$$33-34. F = \frac{B_m^2 S}{16\pi\mu} = 40 \text{ н},$$

где μ — проницаемость воздуха.

33-35. Сила притяжения мембраны к полюсам магнита равна

$$F = \frac{S}{4\pi\mu} (B_0 + B)^2 \approx \frac{S}{4\pi\mu} (B_0^2 + 2BB_0).$$

Нас интересует переменная составляющая, так как она вызывает колебания мембраны

$$F_1 = \frac{SBB_0}{2\pi\mu}.$$

Пренебрегая всеми магнитными сопротивлениями, кроме сопротивления воздушного промежутка, имеем:

$$B = \frac{4\pi\omega I\mu}{2l}.$$

Отсюда амплитуда силы F_1

$$F_{1m} = \frac{SB_0\omega I_m}{l} = 48 \text{ дин}.$$

33-36. 44,4°.

34-1. $4,7 \cdot 10^{-4}$ сек.

$$34-2. \text{ а) } I = U_0 \sqrt{\frac{C}{2L}} = 44 \text{ ма}; \text{ б) } \Phi_{\max} \approx 1,1 \text{ мкс}.$$

34-3. 10^{-5} вт.

34-4. а) Нет; б) да.

34-5. Не изменится.

$$34-6. \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \sqrt{1 - \frac{\rho^2 C I}{4S^2 \mu}} = 2,5 \cdot 10^{-5}.$$

$$34-7. \phi = \frac{2\pi P}{U^2} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,02.$$

$$34-8. \phi = \frac{\pi \beta}{\sqrt{n^2 - 1} (1 + \beta)} = 0,028.$$

$$34-9. \text{ а) } \mathcal{E} = \frac{E^2 (L + C R_1^2)}{2 (R_1 + R_2)^2} = 380 \text{ эрг};$$

б) 7 эрг.

$$34-10. \text{ а) } \phi = 2\pi \sqrt{\frac{R^2 C}{4L - R^2 C}} = 0,2\pi = 0,63;$$

б) максимум тока имеет место при фазовом угле ωt_1 , определяемом из соотношения

$$\operatorname{tg} \omega t_1 = \frac{4\pi}{\theta}; \quad \omega t_1 = 87,1^\circ.$$

От начала колебания до максимума тока пройдет 0,24 периода;

в) напряжение на конденсаторе равно

$$U = I \left(\frac{R}{2} + \frac{L\omega}{\operatorname{tg} \omega t} \right).$$

При $t = t_1$,

$$U = I_m R.$$

Отношение энергий магнитного и электрического полей в этот момент равно

$$\frac{L}{CR^2} = 25;$$

г) максимум напряжения имеет место при $\frac{dU}{dt} = -\frac{I}{C} = 0$. т. е.

при $I = 0$.

Напряжение равно нулю при

$$\operatorname{tg} \omega t_2 = -\frac{4\pi}{\theta}; \quad \omega t_2 = 92,9^\circ.$$

Это соответствует 0,26 периода;

$$\text{д) } U_{\max} = \frac{I_0 \pi R}{\theta} \cdot e^{-\frac{R}{L} t}. \text{ При } t=0, U = \frac{I_0 \pi R}{\theta}.$$

Отсюда $I_0 = 0,05$ а.

$$35-1. 20 \ 700 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}.$$

$$35-2. 1340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$35-3. -1,9 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}.$$

35-4. Вследствие того, что скорости распространения продольных и поперечных колебаний различны.

35-5. 13,25°.

35-6. 31,4 сек.

35-7. 1,42.

35-8. Скорость звука меньше средней скорости молекул для одноатомного газа в 1,236 раза; для двухатомного в 1,349 раза.

35-10. а) 212 гц; б) 106 гц.

35-11. 20° С.

35-12. 398 гц.

35-13. 20 см; 6,6 мм или 3,4 мм.

35-14. 0,05.

35-15. 2040 гц; 6120 гц; 10 200 гц.

35-16. а) 0,52 эрг; б) $2,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$; $4,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$.

35-17. 1,24 вт.

35-18. $8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

35-19. 17,6 гц.

35-20. 11,3 км.

35-21. $2,1 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

35-22. а) Нет; е) $7,4 \cdot 10^7$ гц.

35-23. $8,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{в}}{\text{см}}$.

35-24. На расстоянии 21,8 км от среднего наблюдателя.

35-25. б) $x = \frac{\lambda}{2 \sin u} = 17 \text{ мм}$.

35-26. Сила электрического взаимодействия в m^2 раз больше сил магнитного взаимодействия.

36-1. а) $4,7 \cdot 10^{-3}$; б) $4,7 \cdot 10^{-9}$.

36-2. $8,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}$.

36-3. 27,76° С.

36-4. Разборчивость речи связана с наличием верхних частот. Коэффициенты поглощения в воздухе для высших частот больше, чем для низких, а потому верхние частоты ослабляются в большей мере, чем нижние.

36-5. а) 1,26; б) 1,12.

36-6. $0,001 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$.

36-7. 51,3 дб.

36-8. а) 26 дб; б) 100 м.

36-9. 0,12 сек⁻¹.

36-10. а) 1) Частота 256 гц; порог слышимости; амплитуда давления

$\Delta p_1 = 0,005 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$; интенсивность звука $I_1 = 3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$; верхняя граница:

$\Delta p_2 = 2000 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$; $I_2 = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

2) Частота 2048 гц; $\Delta p_1 = 0,0003 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$; $I_1 = 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

$\Delta p_2 = 1600 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$; $I_2 = 3 \cdot 10^4 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

б) Частота 32 гц не слышна; частота 2048 гц имеет громкость 70 дб.

в) Около 20 дб. г) Около $3 \cdot 10^{-4} \text{ вт}$.

36-12. 680 гц.

36-13. а) и б) $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$.

36-14. а) 1,88 сек; б) 2,12 сек.

37-1. а) $0,0033 \frac{\text{вт}}{\text{лм}}$; б) $0,0023 \frac{\text{вт}}{\text{лм}}$.

37-2. 9 лк.

37-3. 15,3 лк.

37-4. Увеличится в 1,12 раза.

37-5. 25 000 св.

37-6. а) 10,2 лк; б) 10,9 лк.

37-7. а) Около 10 лк. б) Расстоянию 7 м соответствует угол с вертикалью $\alpha = 54,5^\circ$. По кривой видно, что сила света в этом направлении равна 73 св. Освещенность около 1,7 лк. в) Около 7,7 лк и 1,3 лк.

37-8. 6 сек.

37-10. 46 сек.

37-12. 30,4 лк.

37-13. $E = \frac{F}{2\pi a l} = 700 \text{ лк}$.

37-14. 7000 нт.

37-15. а) $h=b$; $E_{\max} = \frac{SB}{4b^2} = 41 \text{ лк}$;

б) 11,5 лк.

37-16. $530 \phi = 5,30 \cdot 10^6 \text{ лк}$.

37-17. а) 40 лк; б) 12,7 нт.

37-18. 5%.

37-19. а) 1,27 лк; б) 0,72 лк.

38-1. а) $x = 2r \sin \alpha = 10,6 \text{ см}$.

б) Сместится в противоположном направлении на расстояние

$y = l \cdot \cos \alpha = 1,7 \text{ см}$.

38-2. 0,02 св.

38-4. а) На расстоянии 120 см от вершины зеркала; б) 1 св.

38-5. Из условия

$$\frac{R}{2} - BO = \frac{R}{2} \cdot 0,01$$

следует: $CB = 0,505R$.

С другой стороны (рис. 22),

$$CB = \frac{R^2}{2\sqrt{R^2 - a^2}}.$$

Отсюда $\frac{a}{R} = 0,14$.

38-7. 24 см.

38-9. Зеркало должно образовать с горизонтом угол 34° .

38-10. $68^\circ 18'$.

38-11. а) Для доказательства возьмем три луча, лежащие в вертикальной плоскости XY, причем ось Y направлена вдоль поверхности воды (рис. 23). Уравнения лучей внутри воды имеют вид:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_1 + b_1;$$

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_2 + b_2;$$

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_3 + b_3.$$

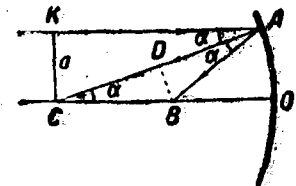


Рис. 22.

Так как они исходят из одной точки S , то имеет место соотношение:

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \alpha_1 b_1 \\ 1 & \operatorname{tg} \alpha_2 b_2 \\ 1 & \operatorname{tg} \alpha_3 b_3 \end{vmatrix} = 0.$$

Уравнения преломленных лучей имеют вид:

$$\begin{aligned} y &= x \operatorname{tg} \beta_1 + b_1; \\ y &= x \operatorname{tg} \beta_2 + b_2; \\ y &= x \operatorname{tg} \beta_3 + b_3. \end{aligned}$$

Так как $\operatorname{tg} \alpha_1 : \operatorname{tg} \alpha_2 : \operatorname{tg} \alpha_3 \neq \operatorname{tg} \beta_1 : \operatorname{tg} \beta_2 : \operatorname{tg} \beta_3$,

то

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \beta_1 b_1 \\ 1 & \operatorname{tg} \beta_2 b_2 \\ 1 & \operatorname{tg} \beta_3 b_3 \end{vmatrix} \neq 0.$$

Это означает, что преломленные лучи не имеют общей точки.

38-12. Так как глаза наблюдателя находятся на одной высоте, то кажущееся положение предмета находится на той же вертикали, как и его истинное положение. Принимая это во внимание, находим:

$$h_0 = h \sqrt{\frac{(n^2 - 1) l^2}{(H + h)^2} + 1} = 2 \text{ м.}$$

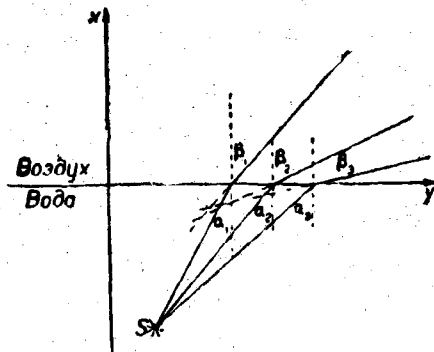


Рис. 23.

38-13. 32 см.

38-14. а) Да; б) нет.

38-15. 2 см.

38-16. 1,14 св.

38-19. а) 81° ; б) $\sqrt{2} < n < 2$.

38-20. 16° .

38-21. Угол между соседними гранями призмы должен быть равен $\theta + \epsilon_m$.

38-22. $10,9^\circ$.

38-23. Лучи выходят из призмы параллельно прежнему направлению. Расстояние между ними не меняется. Длины лучей в призме одинаковы.

38-24. а) Луч не пройдет ни при каком угле падения; б) луч пройдет при условии:

$$0 < \gamma < \frac{\pi}{2}, \text{ где } \gamma - \text{угол, показанный на рисунке 24;}$$

$$\text{в) луч пройдет при условии: } 0 < \gamma < \frac{\pi}{2} + \arcsin n \cdot \sin(\beta_0 - \theta).$$

38-25. В шестигранных призмах грани образуют между собой углы 120° , 60° и 90° . Гало 22° соответствует углу 60° ; гало 46° — углу 90° .

38-26. Угол наименьшего отклонения равен:

$$\epsilon_{\min} = 38^\circ 56'.$$

Наибольшее отклонение имеет место в том случае, когда луч выходит из призмы под углом, близким

$$\text{к } \frac{\pi}{2}. \text{ В таком случае у первой грани угол падения}$$

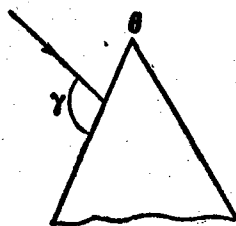


Рис. 24.

равен $\epsilon_{\max} + \theta - \frac{\pi}{2}$, а угол преломления $\theta - \beta_0$, где предельный угол β_0 при $n = 1,52$ равен $41^\circ 8'$. Применяя закон преломления, имеем:

$$n \sin(\theta - \beta_0) = \sin\left(\epsilon_{\max} + \theta - \frac{\pi}{2}\right),$$

откуда

$$\epsilon_{\max} = 59^\circ 26',$$

38-27. 1,333.

38-28. 12,5 см.

38-29. $D_1 = 5,2 \text{ дптр}$; $D_2 = -3,9 \text{ дптр}$.

38-30. 1,48 дптр.

38-31. 1,7.

38-32. $-38,5 \text{ см}$.

38-33. 22,5 см.

38-38. 4 дптр.

38-39. На 0,55 мм.

38-40. 20 см.

38-41. Меньшее изображение ярче в $\left(\frac{d+b}{d-b}\right)^2 = 2,25$ раза.

38-43. а) 2500 лк и 12 500 лк; б) 5000 лк и 15 000 лк.

38-44. В 660 раз.

38-45. 9 лк.

38-46. а) $D > 0$, если $\delta < 0$, т. е. если задний фокус F_1'' первой линзы дальше переднего фокуса F_2' второй линзы; $D < 0$, если F_1'' ближе F_2' ; $D = 0$, если F_1'' и F_2' совпадают;

б) $D > 0$, если $\delta > 0$, т. е. F_1'' лежит ближе F_2' (в отрицательной линзе передний фокус лежит сзади линзы); $D < 0$, если F_1'' лежит дальше F_2' ; $D = 0$, если F_1'' и F_2' совпадают;

в) то же, что в случае б);

г) δ всегда положительна, и система может иметь только отрицательную оптическую силу.

38-47. а) На расстоянии 8 см; б) на расстоянии 20 см.

38-48. 60 дптр.

38-49. Увеличить в 3,7 раза.

38-50. 7 дптр.

38-54. а) Первая главная плоскость проходит сквозь вершину передней поверхности линзы; первая фокальная плоскость отстоит от нее на расстоянии 25 см. Вторая главная плоскость проходит внутри линзы на расстоянии 2,3 см от плоской поверхности; вторая фокальная плоскость отстоит от поверхности линзы на 22,7 см;

б) главные плоскости проходят внутри линзы на расстоянии 1,2 см от вершин поверхностей; фокальные плоскости находятся от поверхностей линзы на расстоянии 11,9 см;

в) первая главная плоскость расположена вне линзы на расстоянии 1,9 см от передней поверхности. Первая фокальная плоскость отстоит от линзы на 22,9 см. Вторая главная плоскость находится тоже вне линзы на расстоянии 0,4 см от передней поверхности. Вторая фокальная плоскость находится за линзой на расстоянии 17,1 см от ее поверхности;

г) первая главная плоскость находится перед линзой на расстоянии 2,8 см от ее поверхности. Первая фокальная плоскость находится на расстоянии 24,4 см за задней поверхностью линзы. Вторая главная плоскость находится перед линзой на расстоянии 2,1 см от ее поверхности. Вторая фокальная плоскость проходит перед линзой на расстоянии 32,8 см от ее поверхности;

д) обе главные плоскости проходят сквозь центр шара. Фокальные плоскости находятся на расстоянии 1,6 см от поверхности шара.

38-55. 29,2 см.

38-56. 1,93 дптр.

38-57. 5,8 см.

38-58. а) 17,2 дптр; б) 20,8 дптр; в) 19,0 дптр.

38-59. а) Поверхности шаров должны отстоять друг от друга на 2,5 см; б) 10.

38-61. а) 10 см; б) 2,5.

38-62. 5.

38-63. а) 14,5 см; 17,5 см; б) 64; 670.

38-64. 564.

38-65. а) Увеличение будет равно 0,4; б) 12 дптр и 30 дптр; в) оправа окуляра.

38-68. 9 см.

38-69. 5,8 мм.

39-2. а) Пользуемся формулой, указанной в пункте 1) введения. По рисунку 25 видно, что в данном случае

$$l = L + r \cos \alpha.$$

Далее на основании ответа к задаче 38-1 имеем:

$$d = 2r \sin \alpha.$$

Отсюда, полагая для воздуха $n_1 = 1$, находим:

$$x = \frac{\lambda(L + r \cos \alpha)}{2r \sin \alpha} = 2,9 \text{ мм};$$

б) сместится на расстояние

$$s' = s \frac{L}{r} = 5,4 \text{ см};$$

в) интерференционная картина не сместится, но расстояние между полосами уменьшится вдвое;

г) пользуясь ответом на вопрос б), получим, что смещение полос интерференционной картины, даваемой левым краем щели, по отношению к картине, даваемой правым краем, равно:

$$s' = b \frac{L}{r},$$

где b — ширина щели. Но по условию вопроса г) s' меньше половины расстояния между полосами. Отсюда

$$b \frac{L}{r} < \frac{\lambda(L + r \cos \alpha)}{4r \sin \alpha}.$$

Так как α и u малы, то, пользуясь рисунком 25, можно вывести, что

$$\sin \alpha = \sin u \frac{L + r}{L}.$$

В таком случае

$$b < \frac{\lambda}{4 \sin u};$$

д) 0,052 мм;
е) 5. полюс.

$$39-3. \delta = \pi - \frac{\lambda(L + d)}{xd(n-1)} = 179,5^\circ.$$

39-4. б) 1,1 мм; в) меньше 0,024 мм; г) 18 полос.

39-5. Задача неопределенная; пленка может иметь толщину $k \cdot 104 \text{ нм}$, где $k = 1; 3; 5$ и т. д.

39-6. Пользуясь рисунком 26, можно найти, что увеличение толщины пленки при переходе от одной полосы к другой равно

$$\delta = l \varphi = \frac{\lambda}{2n}.$$

Отсюда

$$\varphi = \frac{\lambda}{2nl} = 9''.$$

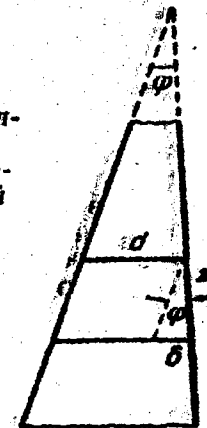


Рис. 26.

39-7. а) Глаз фокусирован на пленку. Принимая во внимание, что $a \gg d$, найдем по рисунку 27

$$\sin u = \frac{d \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha}{a}.$$

Отсюда, пользуясь соотношением 2) введения к параграфу, находим:

$$d_m = \frac{a \lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{2b \sin 2\alpha} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

39-9. 10,2 см.

39-10. а) $r = \sqrt{\frac{2k\lambda(n-1)}{D}} = 3,5 \text{ мм}$; б) 3 мм.

39-11. 175 мм.

39-13. 998-е кольцо, соответствующее меньшей длине волны.

39-15. Так как число зон Френеля равно

$$n = \frac{d^2}{4\lambda} \frac{l}{a(l-a)} = 2,94 \approx 3,$$

то освещенность при наличии ширмы больше, чем при ее отсутствии.

39-17. Нет. Угол φ' внутри стекла соответствует длине волны λ' в стекле:

$$c \sin \varphi' = k\lambda'.$$

Затем при выходе луча из стекла происходит преломление:

$$\sin \varphi' = \frac{\sin \varphi}{n},$$

где φ — измеряемый угол отклонения в воздухе:

$$c \sin \varphi = k\lambda'n = k\lambda,$$

где λ — длина волны в воздухе.

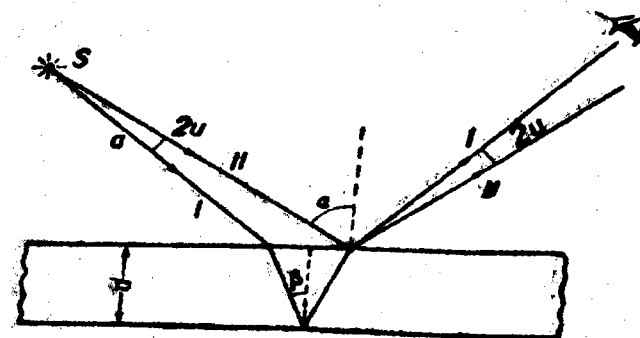


Рис. 27.

Рис. 25.

39-19. 546 нм.

39-20. а) 7'; б) -56'.

39-21. 478 нм.

39-22. а) 3; б) 5.

39-25. а) Если толщина пластинки велика по сравнению с постоянной решетки, то можно считать, что на вторую решетку падают пучки лучей, ширина которых равна длине решетки. В этом случае свет проходит сквозь две решетки, образуя такой же дифракционный спектр, как свет, прошедший сквозь пластинку с одной решеткой;

б) если толщина пластинки равна постоянной решетки, то, кроме света, прошедшего в направлении нормали, свет пройдет только в тех направлениях, которые удовлетворяют соотношению

$$c \cos \varphi = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\lambda}{n},$$

где k_1 и k_2 — целые числа, n — коэффициент преломления.

39-26. а) Постоянную решетки хлористого натрия можно определить из соотношения:

$$d = \sqrt[3]{\frac{\mu}{2ND}},$$

где μ — молекулярный вес хлористого натрия; N — число Авогадро; D — плотность кристалла. Отсюда

$$\lambda = \frac{\sin \theta}{k} \sqrt[3]{\frac{4\mu}{ND}} = 0,58 \text{ \AA};$$

б) для грани (110)

$$d_1 = \frac{d}{\sqrt{2}},$$

отсюда

$$\theta' = 8,4^\circ.$$

39-27. 9,8 мм.

39-28. При большом диаметре зрачка острота зрения уменьшается из-за большой сферической аберрации глаза. При малом диаметре зрачка сказывается искажение изображения дифракционными явлениями.

39-29. Соответствует для острого зрения.

39-30. 4 см.

39-31. а) 1,6; б) 1,272.

39-32. 41°15'.

39-33. 66°40'; 46°40'.

39-34. Луч 1. Полностью поляризован. Его интенсивность 0,1.

Луч 2. После первого преломления получился луч, содержащий 0,8 естественного света и 0,1 поляризованного.

Луч 3. Полностью поляризован. Интенсивность 0,8·0,1=0,08.

Луч 4. Частично поляризован; 0,18 поляризованного света и 0,63 естественного.

39-35. а) 12 раз; б) 65 раз.

39-36. а) Прежде всего надо отметить, что число n не зависит от поглощения света внутри пластинок, так как оно одинаково и для поляризованного, и для естественного света. Поэтому в дальнейшем коэффициент поглощения принят равным нулю. Если сквозь стопу прошло p поляризованного света и $1-p$ естественного, то общая интенсивность до стопы была $2p+1-p=1+p$. Таким образом, интенсивность поляризованного света

равна $\frac{p}{1+p}$ от начальной, а естественного $\frac{1-p}{1+p}$ от начальной. Отсюда можно подсчитать, что интенсивность света, прошедшего сквозь две парал-

лельные стопы, равна $\frac{1+p^2}{(1+p)^2}$ от начальной, а при скрещенных стопах $\frac{1-p}{(1+p)^2}$.

В таком случае

$$n = \frac{1+p^2}{1-p}.$$

Отсюда

$$p = -\frac{n}{2} + \sqrt{\frac{n^2}{4} + n - 1} = 0,89;$$

$$б) p' = \frac{2p}{1+p^2} = 0,994.$$

39-37. 6,06 мм.

39-38. Наблюдатель видит темные полосы на светлом фоне. Расстояние между полосами равно 2,7 см.

39-39. б) 80 см.

40-1. а) $3,31 \cdot 10^{-12}$ эрг; б) $1,99 \cdot 10^{-8}$ эрг; 48 000° К и $2,9 \cdot 10^8$ °К.

40-2. $4 \cdot 10^5$ см⁻²·сек⁻¹.

40-3. а) 197 нм (ультрафиолет.); б) 653 нм (красная часть спектра).

40-4. $6,5 \cdot 10^5$ $\frac{м}{сек}$.

40-5. 3,6.

40-6. 12,41 кв·Å.

40-7. 45 кв.

40-8. а) $4,5 \cdot 10^{-6}$ $\frac{н}{м^2}$; б) $9 \cdot 10^{-6}$ $\frac{н}{м^2}$; в) $6,3 \cdot 10^{-7}$ $\frac{н}{м^2}$.

40-9. Давление света больше в 11 раз.

40-10. а) По направлению света;

б) по нормали.

40-11. Если пластинка обращена к свету блестящей стороной, то на нее действует сила $F_1 = \frac{2IS}{c}$, где S — ее поверхность.

Если пластинка обращена к свету зачерненной стороной, то сила светового давления равна $F' = \frac{IS}{c}$.

В то же время сама пластинка излучает в пространство перед собой полученную энергию. Если она излучает согласно закону Ламберта, то суммарная мощность, излучаемая во всех направлениях, равна

$$IS = \pi I' S,$$

где I' — интенсивность света, излучаемого по нормали.

Суммируя силы отдачи, действующие на пластинку вследствие излучения в разных направлениях, получим общую силу отдачи

$$F'' = \frac{2IS}{3c}.$$

Результирующая сила равна:

$$F_2 = F' + F'' = \frac{IS}{c} \left(1 + \frac{2}{3} \right).$$

Отсюда

$$\frac{F_1}{F_2} = 1,2.$$

40-12. а) Энергия фотонов, отраженных от движущегося зеркала, уменьшается (на волновом языке это проявление эффекта Доплера).

б) Приращение внутренней энергии пылинки меньше энергии поглощенного света.

40-13. а) $2 \cdot 10^{-12}$ см; б) $4 \cdot 10^{-9}$ см.

40-14. $9 \cdot 10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$

40-15. 7'.

40-16. б) Центробежной силой является взаимодействие электрона с протоном:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{\epsilon_0 r_1^2}.$$

Здесь r — радиус окружности, по которой движется электрон; r_1 — расстояние между центрами инерции электрона и протона; ϵ_0 — электрическая постоянная вакуума. Так как масса электрона ничтожно мала по сравнению с массой протона, то

$$r_1 = r = \frac{n^3 h^2 \epsilon_0}{4 \pi^2 e^2 m} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$

в) Если принять, что потенциальная энергия протона и электрона, удаленного из атома в бесконечность, равна нулю, то потенциальная энергия при расстоянии r между ними

$$W_{\text{П}} = \frac{e^2}{\epsilon_0 r}.$$

Кинетическая энергия

$$W_{\text{К}} = \frac{e^2}{2 \epsilon_0 r}.$$

Следовательно, искомая работа

$$A = \frac{e^2}{2 \epsilon_0 r} = 13,56 \text{ эв.}$$

Это число почти совпадает с результатом непосредственного измерения (13,54 эв).

$$\text{г) } \lambda_{\text{H}} = \frac{ch^3 \epsilon_0^2}{2 \pi^3 e^4 m \left(\frac{1}{\pi^2} - \frac{1}{k^2} \right)} = 487 \text{ нм,}$$

что близко совпадает с результатом опыта

$$\Delta \nu = 81 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

д) Приняв во внимание, что ионизированный атом гелия имеет вдвое больший заряд ядра, чем атом водорода, и так же, как и атом водорода, имеет один электрон, получим

$$\lambda_{\text{He}} = \frac{\lambda_{\text{H}}}{4} = 122 \text{ нм,}$$

что тоже близко совпадает с результатом опыта.

41-1. а) 200° K; б) 0,23.

41-2. 8 а.

41-3. 0,063 мм.

41-4. Увеличивается в 1,14 раз.

41-5. 36 та.

41-6. а) 0,11°; б) 1,5 а.

41-7. 5750° K.

41-8. На частицу действуют следующие силы: 1) сила притяжения к Солнцу, равная

$$F_1 = \frac{\gamma \pi d^3 m_{\text{с}} D}{6 R^2},$$

где $m_{\text{с}}$ — масса Солнца; R — расстояние от частицы до его центра; D — плотность железа;

2) сила светового давления со стороны Солнца, равная, если считать, что частица черная,

$$F_2 = - \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sigma T_{\text{с}}^4 \frac{R_{\text{с}}^2}{R^2} \cdot \frac{1}{c},$$

где $R_{\text{с}}$ — радиус Солнца.

При равновесии

$$F_1 + F_2 = 0;$$

$$d = \frac{3 \sigma T_{\text{с}}^4 R_{\text{с}}^2}{2 \gamma m_{\text{с}} D C} = 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

41-10. Около 80%.

41-11. 0,3%.

41-12. 0,22 а.

41-13. 240 000 ккал = $1 \cdot 10^9$ дж.

41-14. $T = T_{\text{с}} \sqrt{\frac{d}{2f}} = 3000^\circ \text{ K.}$

41-15. а) Мощность излучения Солнца, поглощаемая частицей, равна

$$P_1 = A \frac{\pi d^2}{4} \sigma T_{\text{с}}^4 \frac{R_{\text{с}}^2}{R^2},$$

где d — диаметр частицы; $R_{\text{с}}$ — радиус поверхности Солнца; A — коэффициент поглощения.

Мощность излучения частицы по всем направлениям равна

$$P_2 = A \pi d^2 \sigma T^4.$$

При равновесии

$$P_1 = P_2$$

$$T = T_{\text{с}} \sqrt{\frac{R_{\text{с}}}{2R}} = 290^\circ \text{ K.}$$

т. е. мало отличается от средней температуры поверхности Земли;

б) мощность излучения Солнца, поглощаемая частицей, равна

$$P_1 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{2 \pi h c^2 \Delta \lambda}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)} \frac{R_{\text{с}}^2}{R^2}.$$

Мощность, излучаемая частицей, равна:

$$P_2 = \pi d^2 \frac{2 \pi h c^2 \Delta \lambda}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)}.$$

При равновесии

$$P_1 = P_2.$$

имея в виду, что

$$e^{\frac{hc}{\lambda k T_c}} = e^{4,8} \gg 1$$

и что $T < T_c$, получаем:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_c} + \frac{2\lambda k \ln \frac{2R}{R_c}}{hc}} = 1700^\circ \text{K} \text{ (выше, чем серое тело);}$$

в) $T = 230^\circ \text{K}$ (ниже, чем серое тело).

41-16. $-4,8^\circ \text{K}$.

$$41-17. \tau = \frac{Dcd}{12A\sigma} \left(\frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right) = 0,033 \text{ сек},$$

где D и c — плотность и удельная теплоемкость вольфрама.

41-18. В случае переменного тока температура волоска испытывает малые колебания около среднего значения T_0

$$T = T_0 + T_1 \sin 2\omega t \text{ (при } T_1 \ll T_0 \text{)}.$$

Значения T_0 и T_1 могут быть найдены из уравнения теплового баланса

$$\frac{dT}{dt} C = \frac{U^2}{R} - Q_1 - Q_2,$$

где C — теплоемкость волоска, $Q_1 \sim T - T_a$ — есть охлаждение волоска за счет теплопроводности, $Q_2 \sim T^4 - T_a^4$ — охлаждение за счет лучистой теплопроводности (T_a — внешняя температура). Необходимо также учесть зависимость сопротивления волоска R от температуры

$$R = R_0 + R_1(T - T_0) + R_2(T - T_0)^2.$$

Подставляя и сравнивая постоянные и пропорциональные $\cos 2\omega t$ члены уравнения баланса, находим среднее значение

$$Q_2 \sim 1 + \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^2 \left[b_1 + b_2 \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \right].$$

Коэффициент b_2 всегда больше 0, коэффициент $b_1 > 0$ при $R \sim T$.

Вывод. Лучистая теплоотдача больше для переменного тока. Еще в большей степени это правильно для светового потока при типичных значениях T_0 .

41-19. Увеличилось.

41-20. Максимумы функций распределения соответствуют минимумам следующих величин:

1) Для распределения по интервалам частот

$$\lambda^3 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right).$$

2) Для распределения по интервалам длин волн

$$\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right).$$

3) Для распределения по интервалам логарифмов частот (или логарифмов длин волн)

$$\lambda^4 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right).$$

Поэтому значение постоянной C в законе смещения максимума функции распределения в зависимости от температуры для разных функций распределения имеет разную величину. Обычно указывают значение C для распределения по интервалам длин волн (так сделано и в таблице VI).

Для серых тел значение постоянной C то же, что и для полных излучателей.

$$41-21. \text{ а) } \lambda_0 = C \sqrt[4]{\frac{A\pi d l \sigma}{P - P_1}} = 1,2 \text{ мкм};$$

б) 6,9 мкм.

41-22. Обратив внимание, что при указанных условиях $e^{\frac{hc}{\lambda k T}} \gg 1$, можно выразить искомое отношение так:

$$x = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{\frac{hc}{kT} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} = 2,9.$$

41-23. Тепловой поток, проходящий сквозь какое-либо сечение, обусловлен разностью тепловых излучений от точек трубы, расположенных справа и слева от него на расстояниях порядка радиуса трубы. Поэтому этот поток можно оценить по следующей формуле:

$$Q = \sigma \pi R^2 (T_1^4 - T_2^4),$$

где

$$T_1 - T_2 = 2R \frac{dT}{dL}; \quad Q = 8\pi^3 \frac{dT}{dL} \pi R^3 \sigma.$$

Подставляя $T = 1250^\circ \text{K}$; $\frac{dT}{dL} = 1^\circ/\text{м}$, имеем: $Q = 360 \text{ вт}$.

Точный ответ, получение которого требует интегрирования, отличается от найденного нами множителем $\frac{4}{3}$.

42-1. 8 α -превращений и 6 β -превращений.

42-2. 61 сек.

42-3. 4,4 мин.

42-4. $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ г}$.

42-5. 0,34.

42-6. $3,4 \cdot 10^{-7}$.

42-7. По схеме на рисунке 42-1 видно, что число выбрасываемых смесью α -частиц в 4 раза больше числа частиц, выбрасываемых одним радиом,

$$1,48 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1},$$

42-8. 0,66 мм³.

42-9. $1,6 \cdot 10^5$.

42-10. 0,51 Мэв.

42-11. а) 2,2 Мэв; б) 28 Мэв.

42-12. $2,1 \cdot 10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

42-13. Применяя законы сохранения энергии и сохранения количества движения, получим:

$$E_2 = \frac{Q m_3 + E_1(m_3 - m_1)}{m_2 + m_3}.$$

Здесь Q — энергия, связанная с изменением масс частиц и равная

$$Q = (2m_1 - m_2 - m_3) \cdot c^2,$$

а m_1 , m_2 и m_3 суть массы дейтерия, нейтрона и атома ^3He ; $E_1 = 2,6 \text{ Мэв}$.

18 Д. И. Сахаров

42-14. 2800 г.

42-15. $7,5 \cdot 234 - 6,5 \cdot 236 = 221 \text{ Мэв.}$

42-16. $\frac{AEt}{M} = 0,6 \frac{дж}{кз} = 60 \text{ рад.}$

42-17. $\Delta E = \frac{3e^2}{5k} [Z_1(Z_1-1) - Z_2(Z_2-1)] - \Delta E_1 = 1,2 \text{ Мэв.}$

42-18. $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_n} + AqN; \tau = 5 \cdot 10^2 \text{ сек.}$

42-19. Условие критичности есть $\frac{R}{l} = \text{const}$, где R — радиус шара; l —

пробег нейтрона, обратно пропорционально плотности, т. е. $R \sim \frac{1}{\rho}$. Учיתי-

вая, что $R \sim \frac{M^{1/3}}{\rho^{1/3}}$, имеем $M \sim \frac{1}{\rho^2}$

или

$M \sim 1 + 6\alpha\Delta t; M_{25} = 150,15 \text{ кг.}$

42-20. $N = \frac{cM\Delta t}{E} (\nu - 1) = 3 \cdot 10^{15}.$

42-21. Скорости самолетов относительно инерциальной системы отсчета, связанной со звездами, равны

$v = V \pm v_0,$

где V — линейная скорость вращения Земли ($V = \frac{L}{T}; T = 8,64 \cdot 10^4 \text{ сек; } L$ — длина экватора).

Релятивистский эффект отставания часов по отношению к инерциальной системе равен

$\frac{v^2}{2c^2} t,$

где $t = \frac{L}{v_0}$ — время облета.

Разность релятивистских эффектов для двух самолетов равна

$\frac{2Vv_0}{c^2} t = \frac{2L^2}{c^2 T} = 3,36 \cdot 10^{-7} \text{ сек.}$

42-22. Закон сохранения энергии в системе отсчета, в которой в начальный момент ракета покоилась

$M_0 = \frac{M_1}{\sqrt{1-v^2}} + p; p = \frac{M_1 v}{\sqrt{1-v^2}}.$

Отсюда

$v = \frac{M_0^2 - M_1^2}{M_0^2 + M_1^2}.$

42-23. Рассмотрим инвариант $(\Sigma E)^2 - (\Sigma p)^2 = \text{inv.}$ В конечном состоянии находим минимальное значение этого инварианта, используя систему отсчета, где $\Sigma p = 0$ (система центра масс). Имеем $\text{inv.} = 9M^2.$

В начальной системе имеем уравнение:

$(E+M)^2 - E^2 = 2EM + M^2 = \text{inv.}$

Отсюда минимальное значение: $E = 4M = 3,6 \text{ Гэв.}$

I. Некоторые часто встречающиеся числа

	n	$\lg n$
π	3,141593	0,49715
4π	12,56637	1,09921
$\frac{2}{\pi}$	0,63662	1,80388
π^2	9,86960	0,99430
$\sqrt{\pi}$	1,77245	0,24857
e	2,718282	0,43429
$\ln 10$	2,3026	0,33222
$\ln 2$	0,6931	—
$\sqrt{2}$	1,41421	0,15052
$\sqrt{3}$	1,73205	0,23856
1°	0,017453 радиана	
$1'$	0,000291 »	
$1''$	0,0000048 »	

II. Некоторые соотношения между единицами

1. Соотношения между механическими единицами систем СГС и СИ

Величина	Система				Отношение един. СИ един. СГС
	СГС		СИ		
	Название единиц	Обозначение	Название единиц	Обозначение	
Длина	сантиметр	см	метр	м	10 ²
Площадь	квадратный сантиметр	см ²	квадратный метр	м ²	10 ⁴
Объем	кубический сантиметр	см ³	кубический метр	м ³	10 ⁶
Время	секунда	сек	секунда	сек	1
Частота колеба- ний	герц	гц	герц	гц	1
Частота оборо- тов	—	1 сек	—	1 сек	1
Скорость	кин	сек см	—	сек м	10 ³
Угловая ско- рость	—	сек 1	—	сек 1	1
Ускорение	гал	сек см	—	сек м	10 ²
Угловое уско- рение	—	сек ² 1	—	сек ² 1	1
Масса	грамм	сек ³ г	килограмм	сек ³ кг	10 ³
Сила	дина	дин	ньютон	н	10 ⁵
Давление	—	дин см ²	—	н м ²	10

Продолжение

Величина	Система				Отношение един. СИ един. СГС
	СГС		СИ		
	Название единиц	Обозначение	Название единиц	Обозначение	
Плотность	—	$\frac{г}{см^3}$	—	$\frac{кг}{м^3}$	10^{-3}
Работа, энергия	эрг	эрг	джоуль	дж	10^7
Плотность энергии	—	$\frac{эрг}{см^3}$	—	$\frac{дж}{м^3}$	10
Мощность	—	$\frac{эрг}{сек}$	ватт	вт	10^7
Момент силы	—	дин · см	—	н · м	10^7
Момент энергии	—	г · см ²	—	кг · м ²	10^7
Импульс	—	$\frac{г · см}{сек}$	—	$\frac{кг · м}{сек}$	10^5
Угловой импульс	—	$\frac{г · см^2}{сек}$	—	$\frac{кг · м^2}{сек}$	10^7
Вязкость (динамическая)	пуаз	пз	—	$\frac{н · сек}{м^2}$	10

2. Соотношение между единицами давления

- а) 1 нормальная атмосфера (атм) = 760 мм рт. ст. = $1,0333 \frac{кгс}{см^2} = 1,013 \cdot 10^6 \frac{дин}{см^2} = 1,013 \cdot 10^5 \frac{н}{м^2}$;
- б) 1 мм рт. ст. = 0,001316 атм = $1333 \frac{дин}{см^2} = 133,3 \frac{н}{м^2}$;
- в) $1 \frac{кгс}{см^2} = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 9,80665 \cdot 10^4 \frac{н}{м^2}$.

3. Соотношение между единицами работы, энергии

- а) 1 дж = 0,239 кал = $6,242 \cdot 10^{18} \text{ эв}$;
- б) 1 кГМ = 9,80665 дж (при подсчетах принимать 1 кГМ = 9,8 дж);
- в) 1 кал = 4,185 дж = $2,612 \cdot 10^{19} \text{ эв}$;
- г) 1 эв = $1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ дж} = 1,63 \cdot 10^{-20} \text{ кГМ} = 4,45 \cdot 10^{-28} \text{ кат} \cdot ч$;
- д) 1 атм \cdot л = 101,3 дж = 24,1 кал.

4. Соотношения между единицами электрических величин в системах СГС и СИ

Всюду, где в настоящей таблице стоят цифры 3 и 9, следует, строго говоря, ставить 2,99776 и 2,99776². Ввиду малой точности числовых данных в задачах при их решении вполне возможно округление точных чисел до 3 и 9.

Название величины и ее обозначение	Название единицы и ее обозначение		Отношение величины единицы СИ к величине единицы СГС
	система		
	СИ	СГС (симм.)	
Заряд q	кулон $к$	—	$3 \cdot 10^9$
Потенциал, напряжение U , э.д.с. \mathcal{E}	вольт $в$	—	$[3 \cdot 10^2]^{-1}$
Напряженность электрического поля E	вольт на метр $\frac{в}{м}$	—	$[3 \cdot 10^4]^{-1}$
Электрический момент p	кулон·метр $к \cdot м$	—	$3 \cdot 10^{11}$
Индукция электрического поля D Электрическая поляризация P	кулон на квадратный метр $\frac{к}{м^2}$	—	$3,8 \cdot 10^6$
Электрическая проницаемость ϵ' , ϵ	фарада на метр $\frac{ф}{м}$	1	$1,13 \cdot 10^{11}$
Емкость C	фарада $ф$	сантиметр	$9 \cdot 10^{11}$
Сила тока I	ампер $а$	—	$3 \cdot 10^9$
Плотность тока j	ампер на квадратный метр $\frac{а}{м^2}$	—	$3 \cdot 10^6$
Сопротивление R	ом $ом$	—	$[9 \cdot 10^{11}]^{-1}$
Удельное сопротивление ρ	ом·метр $ом \cdot м$	—	$[9 \cdot 10^9]^{-1}$
Напряженность магнитного поля H	ампер на метр $\frac{а}{м}$	эрстед	$4\pi \cdot 10^{-3} = \frac{1}{80}$
Индукция магнитного поля B	тесла $тл$	гаусс	10^4

Название величины и ее обозначение	Название единицы и ее обозначение		Отношение величины единицы СИ к величине единицы СГС
	система		
	СИ	СГС (симм.)	
Магнитный поток	вебер <i>вб</i>	максвелл	10^8
Магнитный момент p	ампер·метр ² $a \cdot m^2$	—	10^3
Намагниченность M	ампер на метр $\frac{a}{m}$	—	10^{-3}
Магнитная проницаемость μ', μ	генри на метр $\frac{гн}{м}$	1	$8 \cdot 10^6$
Индуктивность L , взаимная индукция L_{12}	генри $гн$	—	$[9 \cdot 10^{11}]^{-1}$

Примечание. Числа, стоящие в последнем столбце таблиц II-1 и II-4, есть также отношение численных значений, измеренных в единицах СГС, к численным значениям, измеренным в единицах СИ.

Далеко не все единицы в указанных системах имеют наименования и обозначения. В таких случаях следует после числа ставить наименование системы (например, количество электричества $q=5$ СГС).

5. Разные величины

Длина: микрон (*мкм*); $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$.

Длина: ангстрем (\AA); $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$.

Объем: литр (*л*); $1 \text{ л} = 10^3 \text{ см}^3$ (точнее, $1000,028 \text{ см}^3$).

Освещенность: люкс и фот; $1 \text{ лк} = 10^{-4} \text{ ф}$.

Яркость: нит и стильб; $1 \text{ нт} = 10^{-4} \text{ сб}$.

Теплопроводность:

$$1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}} = 2,778 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}} = 1,162 \cdot 10^{-2} \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}.$$

Приставки к обозначениям единиц

Мега (<i>М</i>)	10^6
Кило (<i>к</i>)	10^3
Деци (<i>д</i>)	10^{-1}
Санتي (<i>с</i>)	10^{-2}
Милли (<i>м</i>)	10^{-3}
Микро (<i>мк</i>)	10^{-6}
Пико (<i>п</i>)	10^{-12}

III. Основные физические величины

1) Гравитационная постоянная: $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{сек}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}$.

2) Нормальная напряженность поля тяготения Земли (ускорение падающих тел): $g_0 = 9,80665 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$. При решении задач принимать g равным $9,80 \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2}$, за исключением особо оговоренных случаев.

3) Число молекул в 1 грамм-моле (число Авогадро):

$$N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ кмоль}^{-1}; N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

4) Молярный объем газа при нормальных условиях: $22,4 \frac{\text{л}}{\text{моль}}$.

5) Универсальная газовая постоянная $R = 8,314 \frac{\text{дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 0,0820 \frac{\text{атм} \cdot \text{л}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 8,314 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 1,986 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$.

6) Молекулярный вес воздуха (средний): $28,9 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$.

7) Постоянная Больцмана:

$$k = 1,380 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{град}} = 1,380 \cdot 10^{-23} \frac{\text{дж}}{\text{град}}.$$

8) Точка таяния льда: $273,16^\circ \text{ К}$ (при решении задач принимать 273° К).

9) Постоянная закона Стефана:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}^4} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^4}.$$

10) Постоянная закона смещения максимума излучения: $C = 0,290 \text{ см} \cdot \text{град}$.

11) Заряд электрона:

$$e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ к}$$

(при решении задач принимать $4,80 \cdot 10^{-10}$ СГС).

12) Масса электрона (покоящегося):

$$m_e = 9,106 \cdot 10^{-28} \text{ г} = 9,106 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

(при решении задач принимать $9,1 \cdot 10^{-28}$ г).

13) Масса протона:

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

14) Число Фарадея:

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{к}}{\text{г} \cdot \text{экв}} = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{к}}{\text{кг} \cdot \text{экв}}.$$

15) Постоянная Планка:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ дж} \cdot \text{сек}$$

16) Скорость света в пустоте:

$$c = 2,99776 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}} = 2,99776 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

(при решении задач принимать $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$)

IV. Атомные массы

Азот	N	14,008	Магний	Mg	24,32
Алюминий	Al	26,97	Медь	Cu	63,57
Аргон	Ar	39,944	Натрий	Na	22,997
Барий	Ba	137,36	Неон	Ne	20,183
Бериллий	Be	9,02	Никель	Ni	58,69
Бор	B	10,82	Олово	Sn	118,70
Бром	Br	79,916	Платина	Pt	195,23
Висмут	Bi	209,00	Радий	Ra	226,05
Водород	H	1,0081	Радон	Rn	222
Вольфрам	W	184	Ртуть	Hg	200,61
Гелий	He	4,004	Свинец	Pb	207,22
Железо	Fe	55,84	Сера	S	32,060
Золото	Au	197,2	Серебро	Ag	107,88
Йод	I	126,92	Углерод	C	12,00
Калий	K	38,096	Уран	U	238,14
Кальций	Ca	40,08	Фосфор	P	31,02
Кислород	O	16,000	Хлор	Cl	35,457
Кремний	Si	28,08	Хром	Cr	52,01
Литий	Li	6,94	Цинк	Zn	65,38

V. Массы частиц, выраженные в атомных единицах массы

($\frac{1}{12}$ массы атома изотопа углерода C^{12})

e электрон	0,00055	${}^1\text{H}^1$ атом водорода	1,00782
n нейтрон	1,00866	${}^1\text{H}^2$ атом дейтерия	2,01410
p протон	1,00728	${}^2\text{He}^3$ атом гелия	3,01602
D дейтон	2,01355	${}^2\text{He}^4$ атом гелия	4,00260
α α -частица	4,00150	${}^3\text{Li}^7$ атом лития	7,01600

VI. Диаметр молекул и атомов (см)

H_2	$2,3 \cdot 10^{-8}$	H_2O	$2,6 \cdot 10^{-8}$
O_2	$2,9 \cdot 10^{-8}$	He	$1,9 \cdot 10^{-8}$
N_2	$3,1 \cdot 10^{-8}$		

VII. Астрономические величины

Средний радиус Земли	6370 км
Масса Земли	$5,96 \cdot 10^{27}$ г
Радиус Солнца	696 000 км
Масса Солнца	$1,97 \cdot 10^{33}$ г
Среднее расстояние от Земли до Солнца	149 000 000 км
Радиус Луны	1735 км
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{25}$ г
Среднее расстояние от Луны до Земли	384 000 км
Угловая скорость вращения Земли	$7,272 \cdot 10^{-5}$ сек $^{-1}$

VIII. Плотности (D)

а) Газы (при нормальных условиях) ($1 \frac{\text{г}}{\text{л}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$)

Воздух	1,293	Кислород	1,429
Углекислый газ	1,977	Водород	0,08988

б) Жидкости ($1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$)

Бензол	0,88	Спирт	0,79
Керосин	0,80	Ртуть	13,6
Скипидар	0,85	Эфир (20° С)	0,714
Касторовое масло	0,97	Глицерин	1,21

в) Твердые вещества ($1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$)

Висмут	9,7	Медь	8,9
Вольфрам	19,0	Натрий хлористый	2,17
Гуммигут	1,2	Никель	8,8
Железо (сталь)	7,8	Свинец	11,3
Лед	0,917	Цинк	7,0

IX. Вязкость (η)

$$1 \frac{\text{н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} = 10 \text{ пз}$$

Воздух при 0° С	$1,8 \cdot 10^{-4}$ пз
Кислород при 0° С	$1,91 \cdot 10^{-4}$ »
Вода при 15° С	0,011 »
Касторовое масло при 20° С	10 »
Глицерин	3,5 »

X. Разрушающее напряжение при растяжении

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 9,8 \cdot 10^4 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$$

Сталь	7000 кгс/см 2
Железо	6000 »
Медь	2400 »
Свинец	200 »
Стекло	300 »

XI. Упругость

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} = 9,8 \cdot 10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$$

Название материала	Модуль упругости I-го рода E $\left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\right)$	Коэффициент поперечного сжатия	Модуль сдвига G $\left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\right)$	Модуль всестороннего сжатия $\left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\right)$
Сталь	20 000	0,3	8000	16 500
Железо	20 000	0,3	8000	—
Медь	12 000	0,35	4500	13 500
Свинец	1 700	0,38	560	—
Стекло	5 000	0,2—0,3	—	3 000
Дерево	1 000	—	—	—
Ртуть	—	—	—	2 500
Вода	—	—	—	200

XII. Коэффициенты теплового расширения

а) линейное расширение (α)

Цинк	$29 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Латунь	$19 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Железо (сталь)	$12 \cdot 10^{-6} \text{ »}$	Стекло	$10 \cdot 10^{-6} \text{ »}$
Медь	$17 \cdot 10^{-6} \text{ »}$	Алюминий	$24 \cdot 10^{-6} \text{ »}$

б) объемное расширение (β)

Ртуть $0,00018 \text{ град}^{-1}$

XIII. Теплоемкости твердых и жидких веществ

Название материала	Теплоемкость		Название материала	Теплоемкость	
	$\left(\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}\right)$	$\left(\frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}\right)$		$\left(\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}\right)$	$\left(\frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}\right)$
Висмут	0,031	130	Медь	0,091	380
Вольфрам	0,03	$1,5 \cdot 10^3$	Свинец	0,032	$1,3 \cdot 10^3$
Железо (сталь)	0,11	460	Спирт	0,59	$2,5 \cdot 10^3$

XIV. Теплоемкости газов

Название газа или пара	Теплоемкость при постоянном давлении C_p		Теплоемкость при постоянном объеме C_v		Коэффициент Пуассона $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$
	$\left(\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}\right)$	$\left(\frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}\right)$	$\left(\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}\right)$	$\left(\frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}\right)$	
Воздух	0,243	1020	0,174	728	1,40
Водяной пар	0,435	1820	0,330	1380	1,32
Аргон	0,127	531	0,0762	319	1,67
Азот	0,249	1040	0,177	741	1,41
Кислород	0,218	912	0,155	649	1,40
Углекислый газ	0,2025	847	0,156	653	1,30

XV. Постоянные Ван-дер-Ваальса

Вещество	a $\left(\frac{\text{л}^2 \cdot \text{атм}}{\text{моль}^2}\right)$	b $\left(\frac{\text{л}}{\text{моль}}\right)$
N_2	1,35	0,04
Ar	1,3	0,03
H_2O	5,47	0,03
CO_2	3,6	0,043
O_2	1,35	0,03
H_2	0,24	0,26

XVI. Теплота плавления

$$\text{Лед} \dots\dots\dots 79,6 \frac{\text{кал}}{\text{г}} = 3,33 \cdot 10^6 \frac{\text{дж}}{\text{кг}}$$

XVII. Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t^\circ\text{C}$	p (мм рт. ст.)	D $\left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3}\right)$	$t^\circ\text{C}$	p (мм рт. ст.)	D $\left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3}\right)$
—23	0,58	0,66	15	12,79	12,8
0	4,58	4,84	16	13,63	13,6
1	4,93	5,22	17	14,53	14,5
2	5,29	5,60	18	15,48	15,4
3	5,69	5,98	19	16,48	16,3
4	6,10	6,40	20	17,54	17,3
5	6,54	6,84	21	18,65	18,3
6	7,01	7,3	22	19,83	19,4
7	7,51	7,8	23	21,07	20,6
8	8,05	8,3	24	22,38	21,8
9	8,61	8,8	25	23,76	23,0
10	9,21	9,4	26	25,21	24,4
11	9,84	10,0	27	26,74	25,8
12	10,52	10,7	28	28,35	27,2
13	11,23	11,4	29	30,04	28,7
14	11,99	12,1	30	31,82	30,3

XVIII. Свойства насыщенного водяного пара

Давление ($\frac{кгс}{см^2}$)	$t^{\circ}C$	Удельный объем пара ($\frac{м^3}{кг}$)	Скрытая теплота испарения		Полная теплота испарения	
			($\frac{ккал}{кг}$)	($\frac{кдж}{кг}$)	($\frac{ккал}{кг}$)	($\frac{кдж}{кг}$)
0,02	17,2	68,3	586,9	2456	604,1	2528
0,1	45,4	14,96	570,4	2387	617,2	2583
0,2	59,7	7,80	563,7	2359	623,3	2608
0,4	75,4	4,071	554,6	2321	630,0	2636
0,6	85,45	2,785	548,6	2296	634,1	2653,7
0,8	93,0	2,127	544,1	2277	637,1	2666
0,9	96,2	1,905	542,0	2268	638,3	2671
1	99,1	1,726	540,2	2261	639,4	2676
1,0333	100	1,674	539,7	2259	639,8	2678
1,23	105	1,420	535,4	2241	640,4	2680
1,8	116,3	0,996	529,1	2214	645,8	2703
2	119,6	0,902	526,9	2205	646,9	2707
3	132,9	0,617	517,7	2167	651,2	2725
4	142,9	0,4708	510,4	2136	654,2	2738
5	151,1	0,3818	504,1	2110	656,4	2747
6	158,1	0,3214	498,7	2087	658,2	2755
7	164,2	0,2778	493,7	2066	659,5	2760
8	169,6	0,2448	489,2	2047	660,7	2765
9	174,5	0,2189	485,0	2030	661,7	2769
10	179,0	0,1980	481,1	2013	662,5	2773
12	187,1	0,1663	473,8	1983	663,7	2778
14	194,1	0,1434	467,2	1955	664,6	2781
16	200,4	0,1261	461,2	1930	665,3	2784
18	206,2	0,1125	455,5	1906	665,8	2786
20	211,4	0,1015	450,3	1884	666,2	2788
30	232,8	0,0679	427,5	1789	666,8	2791
40	249,2	0,0506	408,9	1711	666,4	2789

XIX. Коэффициенты теплопроводности (λ)

	$\frac{ккал}{см \cdot сек \cdot град}$	$\frac{дж}{м \cdot сек \cdot град}$
Воздух	0,000056	0,023
Алюминий	0,5	210
Висмут	0,024	10
Железо	0,14	59
Медь	0,92	380
Свинец	0,083	35
	$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	$\frac{кдж}{м \cdot ч \cdot град}$
Асбест	0,18	0,75
Дерево (перпендикулярно к волокну)	0,15	0,63
Кирпич	0,6	2,5
Накипь котельная	2	8
Сажа	0,06	0,25
Стекло	0,6	2,5

XX. Коэффициенты теплоотдачи (α)

Металл — газ	$3 \cdot 10^{-4}$	$\frac{ккал}{см^2 \cdot сек \cdot град} = 13$	$\frac{дж}{м^2 \cdot сек \cdot град}$
Сажа — газ	20	$\frac{ккал}{м^2 \cdot ч \cdot град} = 84$	$\frac{кдж}{м^2 \cdot ч \cdot град}$
Металл, покрытый накипью, вода	5000	$\frac{ккал}{м^2 \cdot ч \cdot град} = 2,1 \cdot 10^4$	$\frac{кдж}{м^2 \cdot ч \cdot град}$

XXI. Поверхностное натяжение (σ)

$$\left(1 \frac{дж}{м^2} = 1 \cdot 10^3 \frac{эрг}{см^2}\right)$$

Вода при 20° С ¹ . . .	70 $\frac{эрг}{см^2}$	$= 7 \cdot 10^{-2} \frac{дж \cdot м^{-2}}$
Мыльная вода	40	$= 4 \cdot 10^{-2}$
Ртуть	490	$= 49 \cdot 10^{-2}$
Скипидар	27	$= 2,7 \cdot 10^{-2}$
Спирт	22	$= 2,2 \cdot 10^{-2}$

XXII. Удельные сопротивления (при комнатной температуре) и температурные коэффициенты (ρ и α)

Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8} \frac{ом \cdot м}{см}$	$4,2 \cdot 10^{-3} град^{-1}$
Железо	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Никелин	$4 \cdot 10^{-7}$	—
Нихром	$1 \cdot 10^{-6}$	—
Свинец	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Уголь	$4 \cdot 10^{-5}$	$-0,8 \cdot 10^{-3}$

XXIII. Электрические проницаемости (ϵ)

$$\epsilon' = \epsilon \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \frac{ф}{м},$$

где ϵ — электрическая проницаемость, выраженная в единицах СГС;
 ϵ' — электрическая проницаемость, выраженная в системе СИ

Керосин	2 (ед. СГС)
Спирт	26
Слюда	7
Фарфор	6
Стекло	7
Вода	81
Парафин	2

¹ Поверхностное натяжение воды при иных температурах можно вычислить, зная, что при повышении температуры на 1° поверхностное натяжение уменьшается на $0,15 \frac{эрг}{см^2}$.

XXIV. Подвижности ионов (k)

а) Водные растворы

Ag ⁺	0,00056	см ² /в.сек
K ⁺	0,00067	»
H ⁺	0,00324	»
Cl ⁻	0,00068	»
NO ₃ ⁻	0,00064	»

б) Газы при нормальных условиях

	k_+	k_-
Воздух	1,37	1,91
Азот	1,27	1,84

XXV. Работа ионизации ($\varphi \cdot e$)

	однократная	двукратная
Кислород	13,56 эв	48,56 эв
Азот	14,47 »	44,05 »

XXVI. Работа выхода электронов из металла ($\varphi \cdot e$)

Платина	6,3 эв
Цезий	1,2 »
Вольфрам	4,53 »

XXVII. Скорость звука (c)

В воздухе при 0°С	332 м/сек
В воде	1450 »

XXVIII. Коэффициенты преломления (средние для видимых лучей) (n)

Стекло	1,52
Вода	1,333
Лед	1,31

XXIX. Коэффициенты полного излучения (ϵ) и удельные сопротивления (ρ) вольфрама при различных температурах (T)

T (°K)	ϵ	ρ (ом·см·10 ⁸)
1000	0,115	25,7
1500	0,194	41,8
2000	0,260	59,1
2500	0,303	77,2
3000	0,334	96,2
3500	0,351	115,7

XXX. Периоды полураспада радиоактивных веществ (T)

Уран	4,4·10 ⁹ лет = 1,4·10 ¹⁷ сек
Радий	1590 лет = 5,02·10 ¹⁰ сек
Радон	3,825 суток = 3,305·10 ⁵ сек
Актиний	13,5 лет = 4,23·10 ⁸ сек
RaA	183 сек

XXXI. Рекомендуемые обозначения некоторых величин

Длина	l, a, d	Отношение $\frac{c_p}{c_v}$	γ
Ширина	b	Коэффициент полезного действия	η
Глубина, высота	h	Поверхностное натяжение	σ
Диаметр	d	Температура по шкале Цельсия	t
Радиус	R, r	Абсолютная температура	T
Площадь	S, F	Количество теплоты	Q
Объем	V	Внутренняя энергия	U
Время	t, τ	Энтальпия	S
Смещение, путь	s, Δ	Удельная теплоемкость	c
Скорость	v, u	Теплота испарения	r
Ускорение	a	Теплопроводность	λ
Угловое перемещение	φ	Заряд (количество электричества)	q
Угловая скорость	ω	Заряд электрона	e
Угловое ускорение	ϵ	Поверхностная плотность заряда	σ
Масса	m	Объемная плотность заряда	ρ
Плотность	D	Электрическая проницаемость	ϵ
Удельный объем	v	Напряженность электрического поля	E
Сила	F	Индукция электрического поля	D
Вес (в воздухе)	P	Емкость	C
Давление	p	Напряжение (разность потенциалов)	U
Момент силы	M	Электродвижущая сила	E
Момент инерции	I	Величина тока	I
Импульс	K	Плотность тока	j
Угловой импульс	L	Сопротивление	R, r
Работа	A	Удельное сопротивление	ρ
Мощность	P, N	Проводимость	G
Коэффициент трения	μ	Удельная проводимость	g
Энергия	\mathcal{E}	Напряженность магнитного поля	H
Плотность энергии	\mathcal{W}	Индукция магнитного поля	B
Энергия кинетическая	E	Магнитная проницаемость	μ
Энергия потенциальная	Π	Магнитный поток	Φ
Напряженность поля тяготения		Число витков катушки	w
Земли	g	Индуктивность	L
Период	T	Взаимная индуктивность	M
Частота колебаний	f, ν	Кажущееся сопротивление	z
Частота оборотов	n	Вектор Умова — Поинтинга	S
Циклическая частота	ω	Интенсивность волн	I
Разность фаз	φ	Световой поток	F
Длина волны	λ	Освещенность	E
Скорость волн (фазовая)	c	Сила света	J
Скорость волн (групповая)	u	Угол между лучом и нормалью к границе двух сред	i, i_1
Коэффициент затухания колебаний	α	Преломляющий угол призмы	θ
Логарифмический декремент затухания	θ	Фокусное расстояние линзы, зеркала	f
Модуль упругости 1-го рода (модуль Юнга)	E	Оптическая сила	D
Коэффициент поперечного сжатия	μ	Коэффициент преломления	n
Модуль сдвига	G		
Модуль всестороннего сжатия	K		
Коэффициент линейного расширения	α		
Коэффициент объемного расширения	β		
Молекулярный вес	μ		

ОГЛАВЛЕНИЕ

Вниманию студентов 3

Глава I. Механика

§ 1. Кинематика	5
§ 2. Движение свободно падающих и брошенных тел	13
§ 3. Законы движения. Работа, мощность, энергия	17
§ 4. Динамика вращательного движения	27
§ 5. Закон всемирного тяготения	39
§ 6. Статика твердого тела	41
§ 7. Прочность и упругость материалов	46
§ 8. Динамика колебательного движения. Маятники	50
§ 9. Движение жидкостей и газов	56

Глава II. Молекулярная физика

§ 10. Расширение при нагревании твердых и жидких тел	62
§ 11. Свойства идеальных газов	63
§ 12. Первый принцип термодинамики в применении к идеальным газам	67
§ 13. Кинетическая теория газов	72
§ 14. Реальные газы. Критическое состояние	76
§ 15. Молекулярные силы в жидкостях	79
§ 16. Свойства паров. Влажность воздуха	83
§ 17. Свойства растворов	85
§ 18. Второй принцип термодинамики	87
§ 19. Передача теплоты	90

Глава III. Электричество

§ 20. Взаимодействие зарядов	93
§ 21. Потенциал	98
§ 22. Проводники в электрическом поле	103
§ 23. Диэлектрики в электрическом поле	106
§ 24. Емкость	107
§ 25. Закон Ома	113
§ 26. Разветвленные цепи	118
§ 27. Мощность и работа тока	125
§ 28. Электрические явления в металлах	129
§ 29. Электрический ток в газах	131
§ 30. Явления в электролитах	134
§ 31. Магнетизм	135
§ 32. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле и электромагнитная индукция	147
§ 33. Периодические токи	157
§ 34. Электрические колебания	163

Глава IV. Волновые процессы

§ 35. Волны	166
§ 36. Звуковые явления	171

Глава V. Оптика. Строение атома

§ 37. Законы освещения	175
§ 38. Зеркала, призмы и линзы	179
§ 39. Волновая природа света	191
§ 40. Квантовые явления в оптике	201
§ 41. Законы излучения	203
§ 42. Внутряядерные явления и теория относительности	208
Ответы	212
Приложения	275

НБ ПНУС



354404

Митрий Иванович Сахаров

ОРИК ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

Редактор А. И. Юцина, переплет художника Г. С. Богачева. Художественный редактор Т. А. Алябьева. Технический редактор В. Ф. Коскина. Корректоры З. А. Безпалова и К. А. Иванова. Сдано в набор 7/IX 1972 г. Подписано к печати 8/V 1973 г. 60×90/16. Бумага тип. № 3. Печ. л. 18. Уч.-изд. л. 18,04. Тираж 100 тыс. экз. А07068. Издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41. Типография им. Смирнова Смоленского облуправления издательства, полиграфии и книжной торговли. Заказ № 6260, г. Смоленск, пр. им. Ю. Гагарина, 2.

Цена в переплете № 7 72 коп.