

Вариант № 1

Часть А

1.1. Задан график зависимости скорости движения материальной точки от времени. Определить путь, пройденный точкой за первые $\tau = 8$ с движения.

Решение

1. Так как скорость в заданном промежутке времени изменяется в пределах от $v_0 = 4$ м/с до конечной величины $v_\tau = -4$ м/с, то движение является равнозамедленным.

2. Такое движение описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} v(t) &= v_0 - at; \\ x(t) &= v_0 t - \frac{at^2}{2}; \end{aligned} \right\}$$

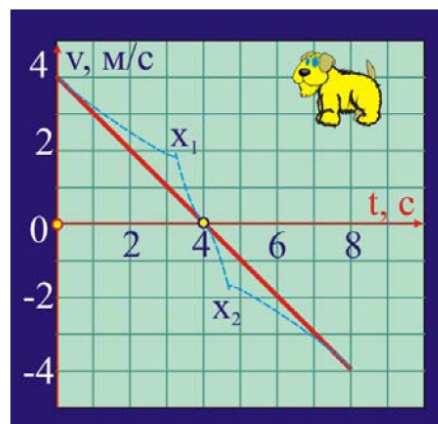


Рис. 1.1. Зависимость $v = f(t)$

3. Для определения пути, пройденного за время τ необходимо по заданному графику определить величину модуля ускорения

$$|a| = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{4}{4} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

4. Через $\tau_1 = 4$ с точка останавливается, пойдя при этом путь

$$x_1 = v_0 t_1 - \frac{at_1^2}{2} = 4 \cdot 4 - \frac{1 \cdot 16}{2} = 8 \text{ м};$$

5. После остановки тело меняет направление движения и проходит за следующие 4 с расстояние $x_2 = x_1 = 8 \text{ м} \Rightarrow x_\tau = 16 \text{ м}$.

6. В правильности результата можно убедиться, подставив значения величин во второе уравнение системы

$$x_\tau = 4 \cdot 8 - \frac{1 \cdot 64}{2} = 0,$$

т.е. перемещение точки за время $\tau = 8$ с равно нулю. С чего начали, тем и закончили.

1.2. Две материальные точки движутся по окружностям R_1 и R_2 , причём $R_2 = 2R_1$. Какими соотношениями связаны их нормальные ускорения при условии равенства их линейных скоростей

Решение

1. Модуль нормального (центростремительного) ускорения точки, движущейся по круговой траектории равен:

$$a_n = \frac{v^2}{r};$$

мальных ускорений точек представятся следующим образом

$$a_{n(1)} = \frac{v}{R_1}; \quad a_{n(2)} = \frac{v}{2R_1};$$

$$\frac{a_{n(1)}}{a_{n(2)}} = \frac{v \cdot 2R_1}{v \cdot R_1} = 2; \Rightarrow a_{n(1)} = 2a_{n(2)};$$

1.3. Чему равно отношение силы гравитационного взаимодействия, действующей со стороны Луны на Землю, к силе гравитационного взаимодействия, действующей со стороны Земли на Луну, если масса Земли в 81 раз больше массы Луны?

Решение

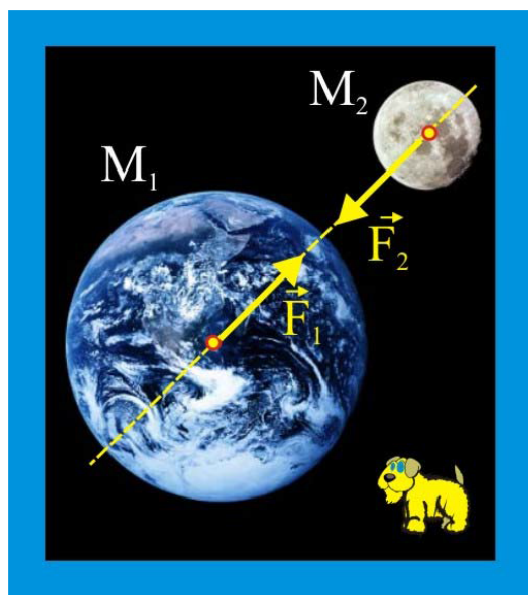


Рис. 1.3. Гравитационное взаимодействие

1. Взаимодействие между двумя телами, включая и космические объекты, описывается гравитационным законом Ньютона

$$F_{\text{Гр}} = G \frac{M_3 M_{\text{Л}}}{r^2},$$

где M_3 , $M_{\text{Л}}$ – массы Земли и Луны, G – гравитационная постоянная, r – расстояние между центрами масс Земли и Луны.

2. В соответствии с третьим законом Ньютона силы взаимодействия направлены вдоль одной линии, равны по модулю и противоположны по направлению. Из этого следует, силы взаимодействия будут одинаковы по модулю, т.е.

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|; \Rightarrow \frac{|\vec{F}_1|}{|\vec{F}_2|} = 1;$$

1.4. Тележка массой $m_1 = 100$ кг, движущаяся со скоростью $v_1 = 3$ м/с, догоняет тележку массой $m_2 = 300$ кг, движущуюся в ту же сторону со скоростью $v_2 = 1$ м/с. Какова скорость совместного движения тележек?

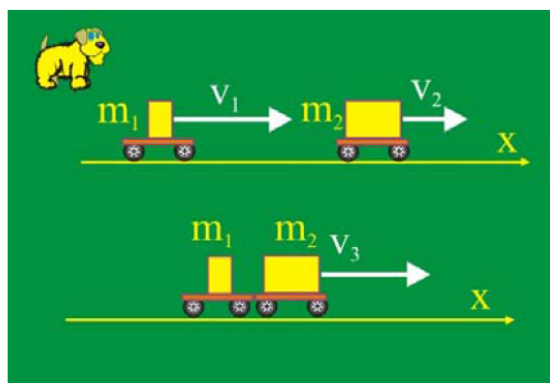


Рис. 1.4. Сохранение импульса

Решение

1. Сталкивающиеся тележки обмениваются своими импульсами, поэтому уместно использовать теорему о сохранении импульса в проекции на направление движения (на ось x)

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_{1,2};$$

$$v_{1,2} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

1.5. Какую надо совершить работу, чтобы поднять груз массой $m = 20$ кг на высоту $h = 1,5$ м?

Решение

1. Примем за нулевой уровень потенциальной энергии поверхность земли, в этом случае подъём груза будет приводить к сообщению ему некоторой величины потенциальной энергии.

2. Изменение потенциальной энергии происходит вследствие совершения работы против силы тяжести

$$A = \Delta\Pi = mgh \cong 20 \cdot 10 \cdot 1,5 \cong 300 \text{ Дж};$$

1.6. Используя график зависимости колеблющейся материальной точки определить смещение из положения равновесия через $\tau = 2$ с после начала движения.

Решение

1. На графике задано гармоническое синусоидальное колебание

$$x(t) = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где $A = 10$ см – амплитуда колебаний, $T = 4$ с – период колебаний, t – время.

2. Подставим в уравнение значения величин

$$x_{\tau} = 0,1 \sin \pi = 0;$$

2. Смещение точки из положения равновесия в момент времени $\tau = 2$ с равно нулю, т.е. материальная точка проходит состояние равновесия.

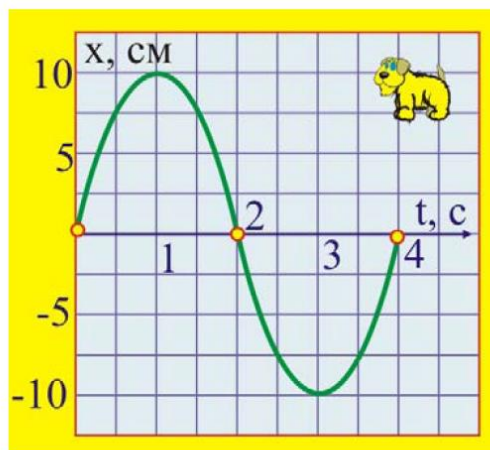


Рис. 1.6. Гармонические колебания

1.7. Какова высота башни, если камень, брошенный с неё горизонтально с начальной скоростью $v_0 = 15$ м/с упал на расстоянии $x_m = 30$ м?

Решение

1. В задаче рассматривается горизонтальный бросок тела с заданной начальной скоростью. В данном случае действует только ускорение $\vec{g}$, которое на оси координат имеет проекции

$$g_x = 0; \quad g_y = -g;$$

2. Вдоль оси ox движение будет равномерным, а вдоль оси oy – ускоренным

$$\left. \begin{aligned} x &= v_0 t; \\ y &= h - \frac{gt^2}{2}; \end{aligned} \right\}$$

3. Из первого уравнения определим время полёта камня

$$x_m = v_0 \tau; \Rightarrow \tau = x_m / v_0 = 2 \text{ с};$$

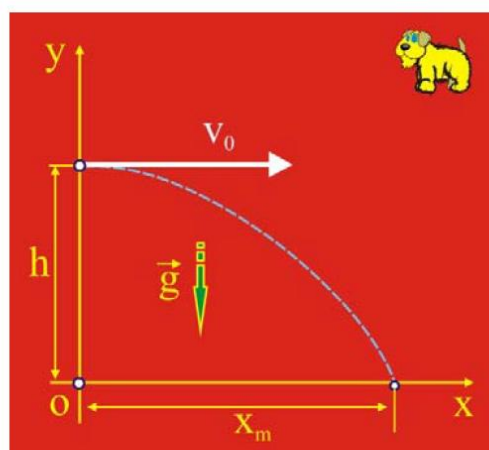


Рис. 1.7. Горизонтальный бросок

4. При падении камня на землю $y = 0$, поэтому второе уравнение системы переписывается в виде

$$h = \frac{g\tau^2}{2} = 20\text{ м};$$

1.8. В сосуде при некоторой абсолютной температуре T находится $\nu_1 = 3$ моля водорода. Какова температура $\nu_2 = 3$ моль кислорода в сосуде того же объёма и при том же давлении? Газы считать идеальными.

Решение

1. Запишем уравнение Клапейрона – Менделеева для идеального газа

$$PV = \nu RT = \frac{m}{\mu} RT;$$

2. По условию задачи $\nu_1 = \nu_2$ поэтому, несмотря на разные молярные массы $\mu_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_2 = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, температура останется постоянной

$$T_1 = T_2;$$

3. Молекулы водорода и кислорода при фиксированном значении температуры будут иметь различные средние арифметические скорости

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}};$$

1.9. При одинаковой температуре $T = 373$ °К давление насыщенных паров воды (H_2O) $P_{S(1)} = 10^5$ Па, аммиака (NH_3) $P_{S(2)} = 6 \cdot 10^6$ Па, ртути (Hg) $P_{S(3)} = 37$ Па. В каком порядке убывания температуры кипения в открытом сосуде находятся эти вещества?

Решение

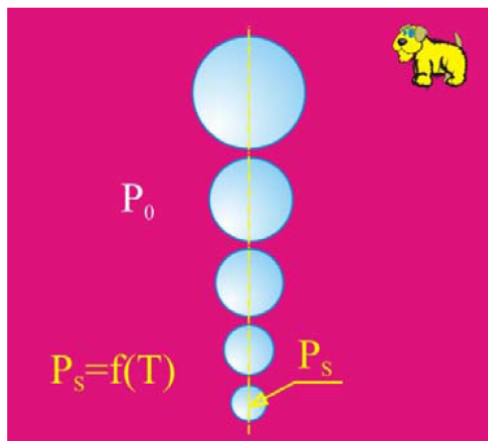


Рис.1.9. Процесс кипения жидкостей

1. Процесс кипения жидкости, в простейшем случае, представляет собой потерю устойчивости и последующий рост объёмов полостей заполненных паром.

2. Достичь состояние кипения можно двумя способами: поднимая температуру жидкости или снижая внешнее давление. В том и другом случае давление жидкости, окружающей сферическую паровую полость P_0 должно быть равно или меньше величины давления насыщенных паров P_s
 $P_0 \leq P_s$,

что собственно и является условием начала процесса трансформации вещества из жидкого состояния в парообразное. Таким, образом, чем выше давление насыщенных паров, тем ниже температура кипения при постоянстве внешнего давления.

3. Расставим вещества по мере уменьшения температуры кипения (возрастания давления насыщенных паров):

1) Hg ; 2) H_2O ; 3) NH_3 ;

1.10. Как изменяется внутренняя энергия тела в процессе его отвердевания?

Решение

1. Изменение внутренней энергии вещества ΔU приближённо может быть определена, как:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T,$$

где i – число степеней свободы молекул вещества, ν – количество вещества, R – универсальная газовая постоянная, ΔT – изменение температуры.

2. Чтобы вещество из жидкого состояния перешло в твёрдое состояние необходимо понизить его температуру, т.е. уменьшить внутреннюю энергию. Значит в процессе отвердения (кристаллизации) внутренняя энергия тела уменьшается.

1.11. Как изменится КПД идеальной тепловой машины, в которой температура нагревателя T_n вдвое выше температуры холодильника T_x , если не меняя температуры нагревателя, вдвое уменьшить температуру холодильника?

Решение

1. Запишем теорему Карно для двух заданных тепловых машин

$$\eta = 1 - \frac{T_x}{T_n}; \quad \eta_1 = 1 - \frac{T_x}{2T_x} = 0,5; \quad \eta_2 = 1 - \frac{0,5T_x}{2T_x} = 0,75;$$

2. При заданной смене параметров нагревателя и холодильника КПД увеличится

$$\Delta \eta = \eta_2 - \eta_1 = 0,25 \text{ (25\%)};$$

1.12. На диаграмме $p = f(T)$ показан процесс изменения состояния идеального одноатомного газа. Известно, что газ отдаёт $Q = 50$ кДж теплоты. Какова величина работы внешних сил?

Решение

1. На диаграмме задан изотермический процесс $T = \text{const}$. Работа такого процесса определяется уравнением

$$A_{1 \rightarrow 2} = \int_{V_1}^{V_2} p dV;$$

2. В подинтегральном выражении содержится две переменные величины p и V . Выразим давление через объём, воспользовавшись уравнением Клапейрона – Менделеева

$$pV = \nu RT; \Rightarrow p = \frac{\nu RT}{V}; \Rightarrow A_{1 \rightarrow 2} = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_1}{V_2};$$

2. Этой формулой в данном случае нельзя воспользоваться т.к. неизвестно количество вещества, участвующего в процессе, однако для решения можно воспользоваться первым началом термодинамики

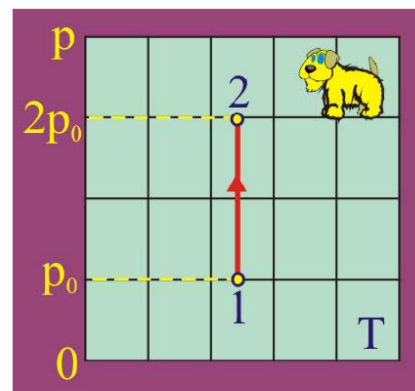


Рис.1.12. Изотермический процесс

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A ;$$

3. Температура в данном случае не изменяется, поэтому

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T = 0; \Rightarrow \Delta Q = A,$$

Всё подводимое к системе тепло преобразуется в работу, т.е.

$$A_{1 \rightarrow 2} = 50 \text{ кДж};$$

1.13. Пылинка, имевшая отрицательный заряд $q_1 = -10 \text{ е}$, при освещении потеряла четыре электрона $\Delta q = -4 \text{ е}$. Каким стал заряд пылинки?

Решение

1. Электрический заряд является квантованной величиной, т.е. он может изменяться только кратно количеству избыточных или недостаточных электронов ($e \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$)

$$Q = eN ;$$

2. С другой стороны, в соответствии с законом сохранения заряда, сумма электрических зарядов для замкнутых систем – величина постоянная

$$\sum_{i=1}^{i=n} q_i = \text{const}; \Rightarrow q_2 = q_1 - \Delta q = -10e - (-4e) = -6e ;$$

1.14. Через участок цепи течёт постоянный ток силой $I = 10 \text{ А}$. Какую силу тока покажет идеальный амперметр?

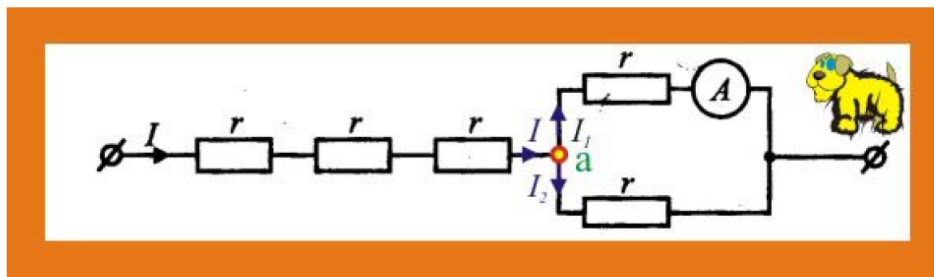


Рис. 1.14. Разветвление цепи

Решение

1. Для решения задачи целесообразно использовать первое правило Кирхгофа. **Первое правило Кирхгофа** (правило узлов) является, по сути своей, законом сохранения заряда в сочетании с условием, что заряды не рождаются и не исчезают в проводнике. Это правило относится к узлам электрических цепей (точка а схемы), т.е. точкам цепи, в которых сходится не менее трёх проводников. Если, принять за положительные направления подходящих к узлу токов, а отходящих – за отрицательные, то алгебраическая сумма токов в любом узле должна быть равна нулю, потому что заряды не могут скапливаться в узле

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0, \Rightarrow I = I_1 + I_2 .$$

другими словами, количество зарядов подходящих к узлу в единицу времени, равно количеству зарядов уходящих от данной точки за то же время.

2. Поскольку оба участка разветвлённой цепи имеют одинаковое сопротивление r , то

$$I_1 = I_2; \Rightarrow I_A = \frac{I}{2} = 5 \text{ A};$$

1.15. В горизонтальной плоскости расположен виток с током I . Определить направление вектора магнитной индукции в центре витка.

Решение

1. Модуль вектора магнитной индукции кругового витка радиуса R с током I в его центре определяется уравнением

$$|B| = \mu_0 \frac{I}{2R};$$

2. Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу "правого винта" или штопора для открывания бутылок. Если правый винт (буравчик, штопор) поместить в центр витка и совместить круговое движение его головки с направлением тока в витке, то направление поступательного движения винта укажет направление вектора магнитной индукции.

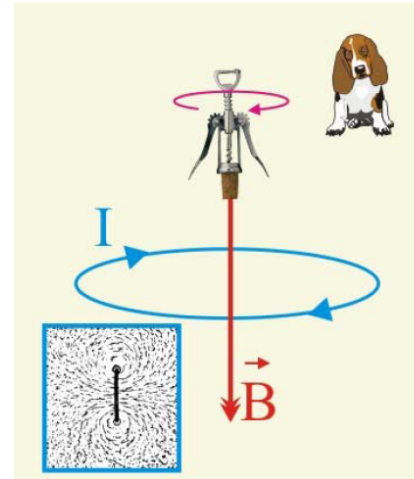


Рис. 1.15. Горизонтальный виток с током и его поле

1.16. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 400$ мкГн и конденсатора ёмкостью $C = 400$ пФ. Определить частоту собственных колебаний контура.

Решение

1. Электромагнитные колебания в LC – контуре при $R \rightarrow 0$ описываются дифференциальным уравнением второго порядка

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0;$$

2. Введём обозначение

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2,$$

где ω_0 – циклическая частота, которая может быть выражена следующим образом

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \frac{2\pi}{T}; \Rightarrow \nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}};$$

$$\nu_0 = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-10}}} \cong 4 \cdot 10^5 \text{ Гц} = 0,4 \text{ МГц};$$

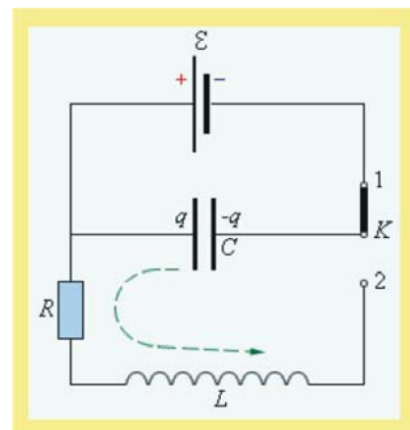


Рис. 1.16. Колебательный контур

1.17. При каких условиях наблюдается интерференция двух световых пучков?

Решение

1. Явление интерференции волн светового диапазона наблюдается только в случае распространения в одном объёме когерентных волн. Запишем условие когерентности двух световых волн

$$\omega = \omega_1 = \omega_2; \quad \lambda = \lambda_1 = \lambda_2; \quad \delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \text{const},$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота, λ – длина волны, δ – разность фаз колебаний.

2. Интерференция в двух световых пучках будет иметь место если составляющие их волны будут иметь одинаковую частоту, что определит и одинаковость их длин волн $\lambda = c/\nu$.

1.18. Какой экспериментальный факт сторонники СТО приводят в качестве основного довода справедливости теории?

Решение

1. Теория относительности разработанная стараниями Лоренца и Пуанкаре была изначально предназначена для электромагнитного поля. Лоренц, исходя из уравнений Максвелла, Герца, Хевисайда пытался совместить из принципом относительности Галилея.

2. Чтобы достичь совместимости уравнений электродинамики принципу относительности пришлось ввести в рассмотрение, так называемые, преобразования Лоренца из которых следовало постоянство скорости распространения электромагнитных волн и функциональная зависимость размеров и массы (применительно к полю) от скорости их движения.

3. Непосредственных экспериментальных фактов, подтверждающих справедливость преобразований Лоренца к материальным объектам, по большому счёту, не существует пока. Вместе с тем, сторонники СТО считают, что есть данные о независимости скорости света от скорости источника и приёмника. Это они и полагают основным доказательством справедливости теории.

1.19. Скорость и заряд частицы, влетевшей в область однородного магнитного поля перпендикулярно силовым линиям увеличили в три раза. Как изменится, при этом, период обращения по окружности?

Решение

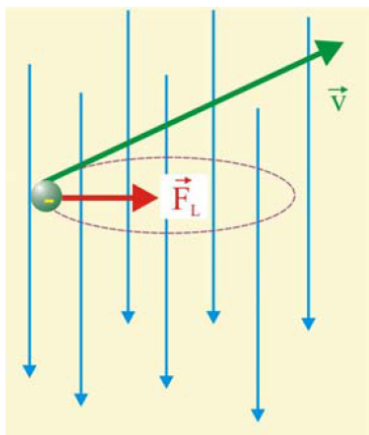


Рис. 1.19. Движение электрона в однородном магнитном поле

1. На основании обобщения многочисленных экспериментальных фактов был получен закон, определяющий количественно величину силы (силы Лоренца), действующей на заряд, движущийся в магнитном поле

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}),$$

где q – электрический заряд, $\vec{v}$ – вектор скорости заряда, $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции, физический смысл которого будет определён ниже. Уравнение силы Лоренца можно записать в скалярной форме

$$F_L = qvB \sin(\vec{v}; \vec{B}).$$

2. Из уравнения F_L можно видеть, что сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости движения частицы, то она не совершает работы, это говорит о неизменности кинетической энергии частицы при её движении в магнитном поле. Сила Лоренца меняет лишь направление вектора скорости, сообщая частице нормальное ускорение.

3. Для случая движения электрона, каковой станет находиться на стационарной круговой орбите, можно записать второй закон Ньютона исходя из равенства модулей силы Лоренца и силы, вызванной нормальным ускорением частицы

$$\frac{m_e v^2}{R} = evB.$$

4. Угловое ускорение, при этом будет равно

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m_e}.$$

5. Период обращения электрона определится как

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m_e}{eB}.$$

6. Таким образом скорость заряда не влияет на период его вращения, влияет при $B = \text{const}$ только величина заряда

$$T_1 = \frac{2\pi m_e}{eB}; \quad T_2 = \frac{2\pi m_e}{3eB}; \quad \frac{T_1}{T_3} = \frac{1}{3},$$

т.е. период уменьшится в три раза.

1.20. Определить энергию фотона с длиной волны $\lambda = 555 \text{ нм}$.

Решение

1. Определим энергию фотона

$$\varepsilon_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,55 \cdot 10^{-7}} \cong 3,567 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

2. Выразим энергию фотона в электрон-вольтах

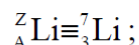
$$\varepsilon_f = \frac{3,567 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 2,23 \text{ эВ};$$

1.21. Как с помощью таблицы Д.И. Менделеева определить заряд в кулонах ядра атома?

Решение

1. Ядра атомов состоят из протонов (положительно заряженных частиц) и нейтронов (частиц, не имеющих заряда). В этой связи заряд ядра, выраженный в кулонах можно определить по числу протонов, умножив его на элементарный заряд, т.е. на заряд электрона.

2. Рассмотрим в качестве примера литий



3. Заряд ядра лития определится как

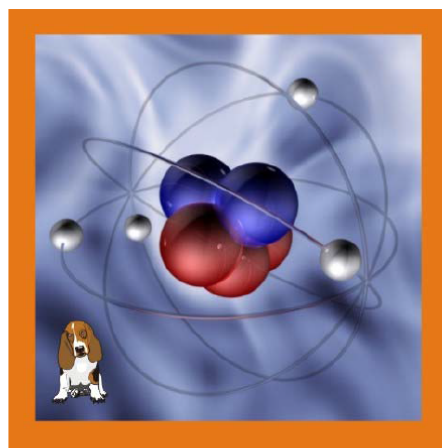


Рис. 1.21. Схема атома гелия

$$Q_{Li} = A \cdot e = 3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cong 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

4. В соответствие с моделью атома Э. Резерфорда на орбитах вокруг ядра лития вращаются три электрона.

1.22. Дан график зависимости числа не распавшихся ядер изотопа радиоактивного вещества от времени. Определить время, в течение которого число не распавшихся ядер уменьшится в четыре раза.

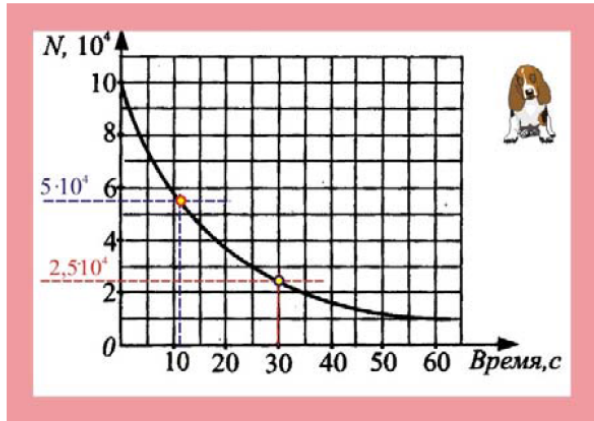


Рис. 1.22. Период полураспада

Решение

1. Определим по графику период полураспада изотопа, т.е. время в течение которого распадётся половина ядер $N_{1/2} \cong 5 \cdot 10^4$, это время составит $T_{1/2} \cong 12$ с.

2. Четверть ядер от их исходного количества, судя по заданному графику, равно: $N_{1/4} \cong 2,5 \cdot 10^4$.

3. Время в течение которого остаётся четверть не распавшихся

ядер составляет $\tau_{1/4} \cong 30$ с.

1.23. Работа выхода электронов из цинка равна $A \cong 3,7$ эВ. Определить красную границу фотоэффекта (критическое значение длины волны падающего света) для цинка.

Решение

1. Запишем уравнение внешнего фотоэффекта Генриха Герца

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{m_e v^2}{2};$$

2. Для критической длины волны (красная граница) уравнение перепишется в виде

$$\frac{m_e v^2}{2} = 0; \Rightarrow \frac{hc}{\lambda_0} = A; \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{A} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 334 \text{ нм};$$

1.24. При исследовании превращения радиоактивных веществ в двух опытах было установлено, что число частиц N , образующихся в единицу времени при радиоактивном распаде, убывало в соответствии с приведенными графиками. Какова причина столь существенного хода кривых?

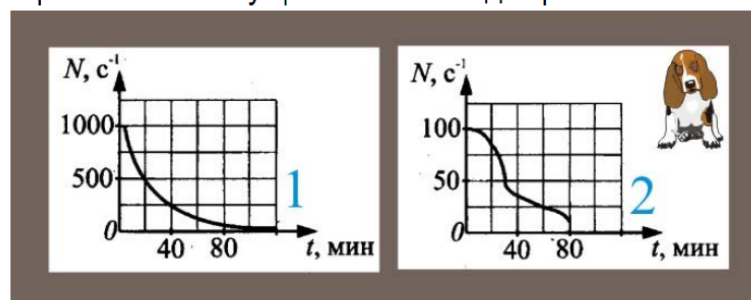


Рис. 1.24. Частота распада ядер

Решение

1. Теория радиоактивного распада, сформулированная в работах Резерфорда и Содди основана на опытном факте статистического смысла процесса. Однородные ядра одного и того же вещества распадаются за разное время, однако среднее время жизни ядра не зависит от способа его получения и внешних условий (температуры, давления и агрегатного состояния).

2. Полагая, что отдельные ядра распадаются независимо друг от друга, для количества ядер dN распадающихся за время dt , можно записать уравнение

$$dN = -\lambda N dt,$$

где N – общее количество радиоактивных ядер имеющихся в момент времени t , λ – индивидуальная характеристика данного радиоактивного элемента, именуемая постоянной распада.

3. Постоянная распада λ имеет вероятностный смысл и характеризует вероятность распада ядер за единицу времени.

4. Приведенные графики отличаются количеством регистрируемых в единицу времени распадов в 10 раз. График 1 даёт более статистически верные результаты, ввиду анализа большего количества актов в секунду. Если монету бросить, заставив её вращаться, три раза, то все три раза может выпасть "орёл", но если мы будем крутить монету многократно, то получим вероятность выпадения "орла" около 0,5.

5. Вероятнее всего, если условия эксперимента 1 и 2 были идентичными, форма левого графика, отличного от экспоненты объясняется малым количеством зарегистрированных актов распада, т.е. вероятностным характером закона радиоактивного распада.

1.25. В таблице приведены результаты исследования зависимости квадрата времени падения шарика для настольного тенниса от высоты

t^2, c^2	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$h \cdot 10^{-2}, m$	0	20	40	60	80	100

Оценить, на сколько сопротивление воздуха "уменьшает" ускорение падения шарика по сравнению со стандартным ускорением свободного падения $g \cong 9,8 \text{ м/с}^2$.

Решение

1. Уравнение в соответствие с которым шарик будет свободно падать можно записать следующим образом:

$$h = \frac{at^2}{2}; \Rightarrow a_1 = \frac{2h_1}{t_1^2} = \frac{0,4}{0,05} = 8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad a_2 = \frac{2h_2}{t_2^2} = \frac{0,8}{0,1} = 8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

2. Таким образом, все измерения дают ускорение падения $a = 8 \text{ м/с}^2$, т.е. сила сопротивления воздуха "уменьшает" ускорения на $\Delta a = 1,8 \text{ м/с}^2$

Вариант № 2

Часть А

2.1. В субботу автобус сделал десять рейсов по своему маршруту, а в воскресенье – двенадцать. В какой из дней автобус совершил большее перемещение?

Решение

1. Введём в рассмотрение сразу три величины, характеризующих движение – **траекторию, путь и перемещение**.

2. **Траекторией** называется линия, вдоль которой происходит движение. Траекторию можно рассматривать как геометрическое место точек, в котором последовательно в процессе движения побывал исследуемый объект.

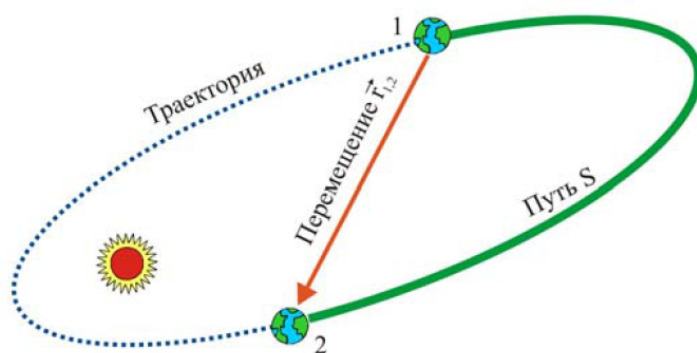


Рис. 2.6. Траектория, путь и перемещение

3. **Путь** – это часть траектории, проходимая движущимся объектом за данный промежуток времени.

4. Рассмотрим схему движения Земли вокруг Солнца. Светило, как известно, расположено в одном из фокусов эллипса, который является траекторией годового путешествия нашей планеты.

5. Если выделить два произвольных положения Земли на траектории, например 1 и 2, то путь представится частью траектории. Он выделен более жирной линией зелёного цвета.

6. В зависимости от геометрического вида траектории происходящие движения могут быть прямолинейными, криволинейными, в частности, круговыми.

7. Если начальную и конечную точки пути соединить направленным отрезком (вектором) $\vec{r}_{1,2}$, то получим **перемещение**.

8. Если автобус начинает путешествие из гаража и там же его заканчивает, но начальная точка его движения совпадает с конечной, поэтому перемещение как в субботу, так и в воскресенье будет нулевым.

2.2. Какой из графиков, приведенных на рис. 2.2 соответствует свободному падению тела без начальной скорости, если вертикальная ось координат направлена вниз?

Решение

1. Поскольку по условию задачи движение является свободным, то протекать оно будет с постоянным ускорением $g \cong 10 \text{ м/с}^2$. Скорость при этом будет определяться кинематическим уравнением:

$$v(t) = gt;$$

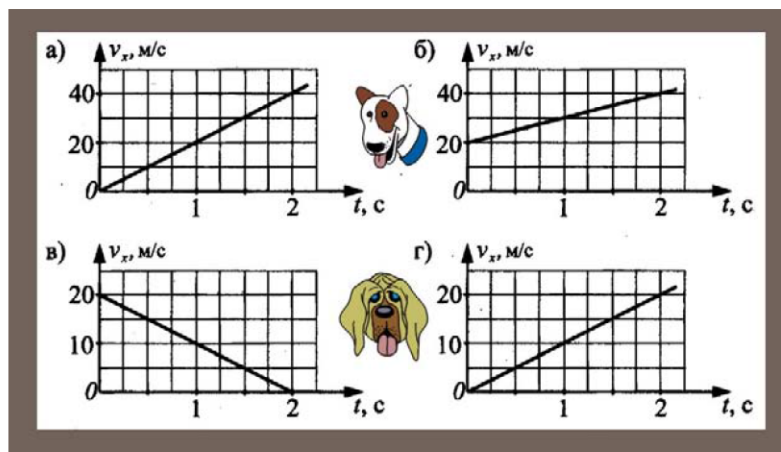


Рис. 2.2. Зависимость скорости от времени

2. Вычислим скорость, например, для момента времени $\tau = 2$ с

$$v_{\tau} = 10 \cdot 2 \cong 20 \text{ м/с},$$

такое значение скорости имеет место только на графике г.

2.3. В каком случае сила давления человека на пол больше: когда он стоит на полу или когда он лежит на полу?

Решение

1. Если речь идёт о силе, то она во всех положениях будет одинаковой и равной весу человека

$$\vec{F} = m\vec{g};$$

2. Давление же человека на пол будет различным, в зависимости от площади соприкосновения тела и пола, потому что давление

$$p = \frac{F}{S},$$

естественно, что в лежащем положении площадь будет больше, а давление меньше.

2.4. Каково изменение импульса тела в промежутке времени от первой до третьей секунды, если модуль силы в течение этого времени остаётся постоянным $F = 4$ Н?

Решение

1. Запишем уравнение второго закона Ньютона для простейшего случая

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt};$$

2. Умножим обе части уравнения на dt

$$\vec{F}dt = m d\vec{v};$$

3. Проинтегрируем уравнение в заданных пределах

$$\vec{F} \int_{t_1}^{t_2} dt = m \int_{v_1}^{v_2} d\vec{v}; \Rightarrow F(t_2 - t_1) = mv_2 - mv_1 = \Delta p; \Rightarrow \Delta p = 8 \text{ Н} \cdot \text{с} = 8 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

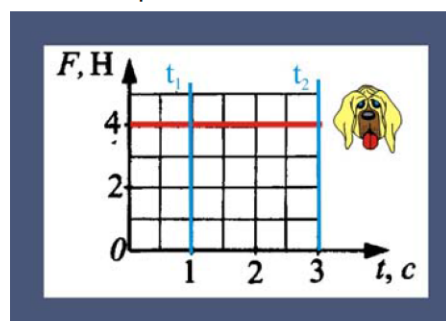


Рис. 2.4. Зависимость силы от времени

2.5. Какую потенциальную энергию будет иметь пуля массой $m = 20$ г, выпущенная вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 600$ м/с? Влиянием сопротивления со стороны воздуха пренебречь.

Решение

1. В отсутствие сопротивления уместно использовать закон сохранения механической энергии: кинетическая энергия пули в момент её покидания среза ствола должна быть равна потенциальной энергии в наивысшей точке траектории

$$\frac{mv^2}{2} = mgh; \quad K = \Pi = \frac{mv^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 3,6 \cdot 10^5}{2} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж} \approx 3,6 \text{ кДж};$$

2.6. Что такое момент силы относительно оси?

Решение

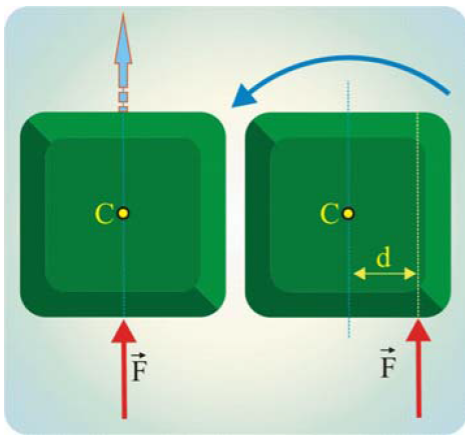


Рис. 2.6.1. Движение под действием силы, приложенной в разных точках тела

1. Практика показывает, что одна и та же сила, будучи приложенной в разных точках тела, вызывает различные типы движений. Если линия действия силы проходит через центр масс тела, то следует ожидать возникновения поступательного движения. В случае смещения линии действия силы на некоторое расстояние d , движение тело будет иметь вращательную составляющую относительно оси, проходящей через центр, перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 2.6.1).

2. Действие силы на механическую систему или твёрдое тело, таким образом, исчерпывающе характеризуется тремя

величинами: **модулем, направлением и линией действия.**

3. Все три величины можно объединить в одну, введя понятие момента силы. Необходимо отметить, что моменты сил можно определять относительно центра (некой характерной точки) и оси, причём эти понятия связаны друг с другом, но не являются эквивалентными. Их следует различать. Момент силы относительно центра является величиной векторной, момент той же силы относительно оси представляется скалярной величиной, потому, что, по сути, представляется проекцией вектора момента силы на эту ось.

4. Пусть в точке А характеризуемой радиус-вектором $\vec{r}$, приложена сила $\vec{F}$. Момент этой силы относительно центра О определится в виде векторного произведения

$$\vec{M}_O(\vec{F}) = (\vec{r} \times \vec{F}),$$

$$|\vec{M}_O(\vec{F})| = |\vec{r}| |\vec{F}| \sin(\vec{r}; \vec{F}).$$

5. **Момент силы относительно оси определяется в виде произведения модуля действующей силы на плечо**, т.е. на кратчайшее расстояние между линией действия силы и осью, относительно которой определяется момент

(рис. 2.6.2). Если сила $\vec{F}$ приложена в точке A и требуется определить момент этой силы относительно оси z, то необходимо провести линию действия силы (голубая пунктирная линия) и найти кратчайшее расстояние между линией действия силы и осью, т.е. расстояние d , которое называется плечом силы $\vec{F}$

$$d = |\vec{r}| \sin \alpha .$$

6. Момент силы считается положительным, если он стремится вращать тело или систему материальных точек против часовой стрелки. Отрицательным считается момент силы, стремящийся поворачивать тело в направлении, совпадающем с ходом часовой стрелки

$$M_z(\vec{F}) = |\vec{F}| |\vec{r}| \sin \alpha = \pm Fd .$$

7. Момент силы не имеет специальной размерности, он измеряется в Н·м. Момент силы может быть равен нулю только в том случае, если длина плеча силы равна нулю.

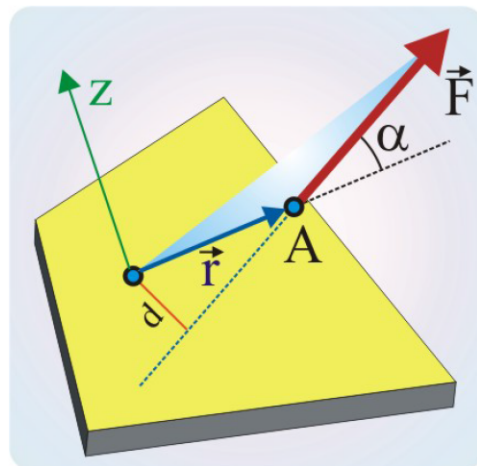


Рис. 2.6.2. Момент силы относительно оси

2.7. Приведена зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний пружинного маятника от частоты возбуждающей силы. Определить отношение амплитуды установившихся резонансных колебаний к амплитуде колебаний на частоте $\nu = 0,5$ Гц.

Решение

1. На частоте $\nu = 0,5$ Гц грузик маятника будет колебаться с амплитудой $A_1 = 2$ см, на резонансной частоте $\nu_0 = 1$ Гц амплитуда колебаний составляет $A_0 = 10$ см.

2. Отношение амплитуд на заданных частотах

$$\zeta = \frac{A_0}{A_1} = 5 ;$$

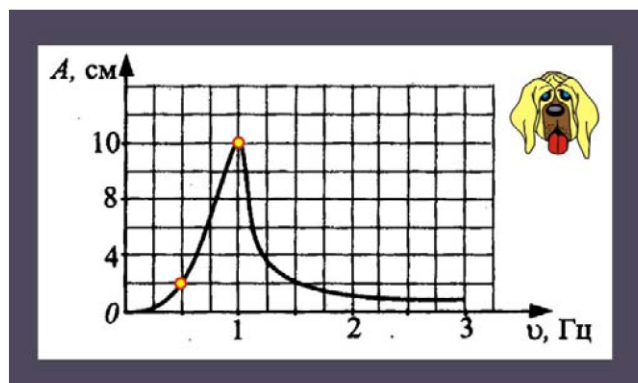


Рис. 2.7.1. Резонансная кривая

2.8. Записать и объяснить физический смысл основного уравнения молекулярно-кинетической теории для идеальных газов.

Решение

1. Газ, запертый в сосуд, оказывает давление на его стенки. Это известно всем и давно. А почему это происходит и каков механизм возникновения этого явления не вполне очевидно. Много путаницы в понимание вносят наши ощущения. Первое, что вызывает противоречивые впечатления, это ощущения атмосферного давления, вернее отсутствие его ощущений. Действительно на поверхности моря давление атмосферного столба воздуха составляет примерно p_0

$\cong 10^5$ Па, это значит, что на каждый квадратный метр поверхности вне зависимости от её ориентации действует сила $F \cong 10^5$ Н, а на площадку $s = 1 \text{ см}^2$, соответственно $F \cong 10$ Н. Это много или мало? Достаточно, чтобы массе в 1 кг сообщить ускорение $a \cong 10 \text{ м/с}^2$. Почему же в таком случае мы не чувствуем этого давления? Это не совсем объективное ощущение. Наш организм начинает болезненно ощущать атмосферное давление при взлёте и посадке самолёта, например, особенно у людей с насморком. Это происходит от того, что давление по обе стороны барабанной перепонки неодинаково, вследствие чего она деформируется, провоцируя дискомфортные ощущения. В рабочем режиме носоглотки давление снаружи и внутри уха одинаково.

2. Как известно у человек, в основном, информацию об окружающем мире получает по трём независимым каналам. Мы видим, слышим и обоняем. Последние два канала напрямую связаны с предметом настоящего рассмотрения, с молекулярной физикой. Наш слух устроен так, что волнообразные движения воздуха приводят в колебательное движение барабанную перепонку, которая подобно мембране микрофона является приёмником волн акустического диапазона 20 Гц – 20 кГц (в случае идеального слуха). Чувствительность барабанной перепонки такова, что наши органы слуха не воспринимают отдельных ударов молекул, которые путешествуют прямолинейно со скоростями, соизмеримыми со скоростями пуль из современного огнестрельного оружия. С пулями молекулы можно сравнивать только по скорости, то что касается массы, то тут они не совпадают примерно на 23 порядка, если принять массу пули равной 10^{-3} кг, а массу молекулы – 10^{-26} кг. Импульс, передаваемый молекулой, будет на 23 порядка меньше, чем у пули, отсюда и столь разные эффекты. Это как при встрече комара с лобовым стеклом мчащейся автомашины. Эти два объекта получают равные импульсы, но с сильно разными последствиями для друг друга. Если бы наш слух, не к ночи будет сказано, стал бы «слышать» удары молекул воздуха о барабанную перепонку, то мы бы ощутили такой же звук как из телевизора, когда на него не поступает сигнала. Мы бы услышали, так называемый белый шум, состоящий из множества гармонических колебаний различных частот и амплитуд. Мы бы начали «слышать» атмосферное давление.

3. Что же такое давление газа? Почему оно возникает? Какие параметры микросостояния определяют его величину? На все это вопросы на количественной основе отвечает **основное уравнение кинетической теории**.

4. Уравнение называется основным, потому что с его помощью можно по-

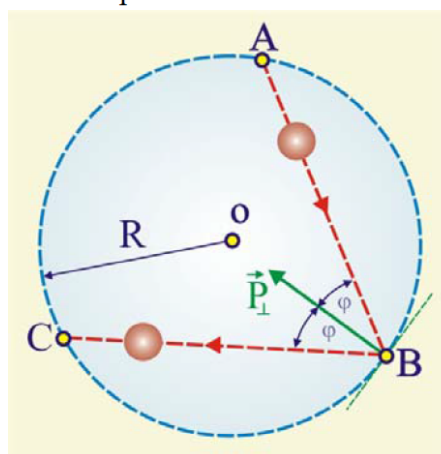


Рис. 2.8. Взаимодействие молекулы со стенкой

лучить все газовые законы, установленные вначале экспериментально, и найти теоретически обоснованную количественную зависимость кинетической энергии молекул от температуры. Наконец Разобраться с физическим смыслом давления, одного из основных макропараметров, который, как и все прочие, определяется состоянием вещества на микроуровне.

5. Рассмотрим сферический объём идеального газа некоторого радиуса R , содержащий N^* молекул идеального газа (рис. 2.8). Состояние газа сопровождается соударениями молекул друг с другом и со стенками.

6. Выделим мысленно из всего ансамбля хаотично движущихся молекул одну и предположим, что за рассматриваемый промежуток времени «меченная» молекула перемещается по траектории ABC, причём в точке B молекула взаимодействует со стенкой. После отскока молекула перемещается по хорде BC, при этом уравнение второго закона Ньютона при абсолютно упругом ударе запишется так:

$$P_k = F_k \tau = 2m_0 v \cos \varphi,$$

7. Таким образом от момента удара молекулы о стенку в точке B до следующего аналогичного события в точке C она проходит прямолинейный путь $s = 2R \cos \varphi$.

8. Рассматриваемая ситуация может наблюдаться только в достаточно разреженном газе при относительно малой величине N^* . Определим далее частоту столкновений молекулы со стенками, которая будет пропорциональна скорости и обратно пропорциональна проходимому расстоянию

$$v = \frac{v}{2R \cos \varphi}.$$

9. В единицу времени рассматриваемая молекула будет передавать стенке в течении v столкновений импульс

$$P_k = 2m_0 v \cos \varphi \cdot v = 2m_0 v \cos \varphi \frac{v}{2R \cos \varphi} = \frac{m_0 v^2}{R}.$$

10. Всеми N^* молекулами, находящимися в выделенном объёме сообщаемый в единицу времени импульс определится в виде суммы

$$P = \sum_{k=1}^{k=N^*} P_k = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^{k=N^*} m_0 v^2.$$

11. Давление газа определится как сила, делённая на площадь

$$p = \frac{F}{s} = \frac{1}{R s \tau} \sum_{k=1}^{k=N^*} m v^2,$$

для единичного промежутка времени, где m – масса всего газа

$$p = \frac{1}{R} \frac{\sum_{k=1}^{k=N^*} m v^2}{4\pi R^2}.$$

12. Выделим в последнем уравнении величину сферического объёма, для чего поделим числитель и знаменатель на 3

$$p = \frac{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^{k=N^*} m v^2}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{1}{3} \frac{\sum_{k=1}^{k=N^*} m v^2}{V}.$$

13. Умножим обе части уравнения на объём V

$$pV = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{k=N^*} m v^2.$$

14. Чтобы в правой части уравнения получить уравнение кинетической энергии, умножим и поделим на 2

$$pV = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{k=N^*} \frac{m v^2}{2} = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{k=N^*} \varepsilon_k,$$

где ε_k – кинетическая энергия «меченой» молекулы. Если все N^* молекул газа имеют одинаковые массы, то в уравнении суммирование будет производиться

только по скоростям. Умножим и поделим правую часть уравнения на N^* с целью образования средней квадратичной скорости c

$$pV = \frac{1}{3} m N^* \frac{\sum_{k=1}^{N^*} v_k^2}{N^*} = \frac{1}{3} N^* m \langle v^2 \rangle ,$$

$$\frac{N^*}{V} = n; \Rightarrow p = \frac{1}{3} n m \langle v^2 \rangle ;$$

15. Чтобы в правой части уравнения получить кинетическую энергию молекулы умножим и разделим правую часть на 2

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}; \quad p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_0 \rangle ,$$

где $\langle \varepsilon_0 \rangle$ – среднее значение кинетической энергии молекулы.

16. Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии всех молекул, содержащихся в единице объёма.

2.9. Какой функцией описывается зависимость давления насыщенных паров от температуры?

Решение

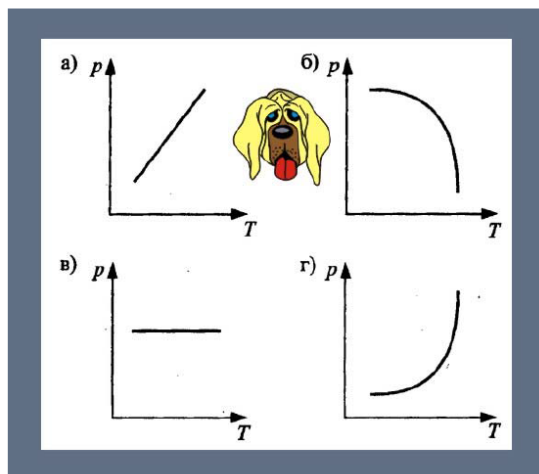


Рис. 2.9. Зависимости $p_s = f(T)$

1. Давление насыщенного пара зависит от температуры T и удельной теплоты парообразования r

$$p_s = p_0 \exp \frac{\mu r}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right),$$

где p_0 – давление насыщенных паров при известной температуре T_0 , μ – молярная масса, r – удельная теплота парообразования, R – универсальная газовая постоянная, T – текущая температура.

2. Таким образом, давление насыщенных паров от температуры растёт по восходящей экспоненциальной кривой, чему соответствует заданный по условию график г.

2.10. Какими параметрами определяется внутренняя энергия газа, помещённого в герметичный сосуд неизменного объёма?

Решение

1. Изменение внутренней энергии газа описывается уравнением:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T ;$$

2. Для идеального газа число степеней свободы молекулы $i = 3$, поэтому:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T ;$$

3. Величина абсолютной температуры, в свою очередь, определяет скорость хаотического движения молекул.

2.11. Какова сообщённая газу теплота в некотором термодинамическом процессе, в котором внутренняя энергия уменьшилась на $\Delta U = 300$ Дж, и газ совершил работу $A = 500$ Дж?

Решение

1. Запишем уравнение первого начала термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A; \quad \delta Q = -300 + 500 = 200 \text{ Дж};$$

2.12. Какому из графиков соответствует процесс, изображённый в координатах $P - T$?

Решение

1. Обратим внимание на то, что на участках 1 – 4 и 2 – 3 давление остаётся постоянным, значит следует подвергнуть дальнейшему анализу графики а и г.

2. На участке 3 – 4 давление увеличивается, а на участке 1 – 2 уменьшается, что говорит о соответствии графика $P - V$ а, заданному поведению газа в координатах $P - T$.

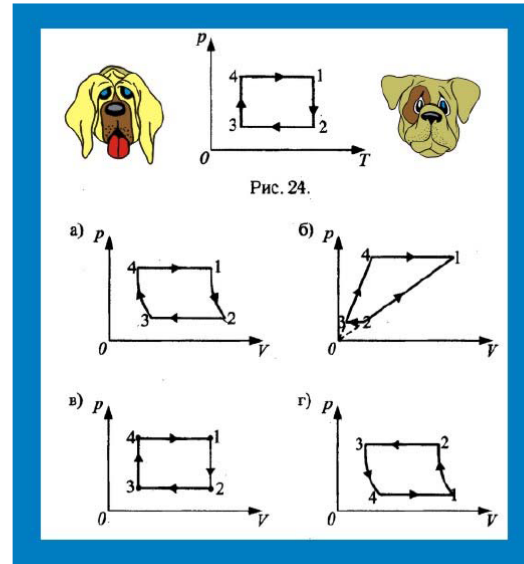


Рис. 2.12. Диаграммы процессов

2.13. Какова ёмкость системы из трёх заряженных конденсаторов, ёмкостью 40 мкФ каждый?

Решение

1. Ёмкость последовательно соединённых конденсаторов

$$C_{1,2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{40 \cdot 40}{40 + 40} = 20 \text{ мкФ};$$

2. Ёмкость параллельно соединённых конденсаторов $C_{1,2}$ и C_3

$$C_{AB} = C_{1,2} + C_3 = 60 \text{ мкФ};$$

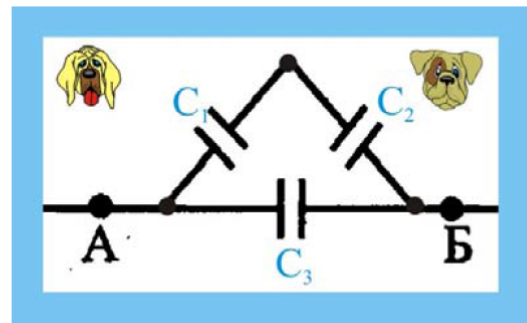


Рис. 2.13. Соединение конденсаторов

2.14. Определить силу тока через резистор R_2 , если шкала амперметра проградуирована в системе СИ.

Решение

1. Амперметр проградуированный в амперах включен в цепь, состоящую из двух последовательно соединённых резисторов R_1 и R_2 . Через последовательно соединённые сопротивления течёт одинаковый ток, поэтому искомая сила тока, судя по приведенной шкале, составит $I_2 = 5,5$ А.

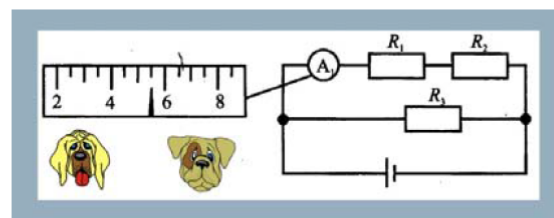


Рис. 2.14. Сила тока в цепи R_2

2.15. Чем определяется величина ЭДС индукции в замкнутом контуре?

Решение

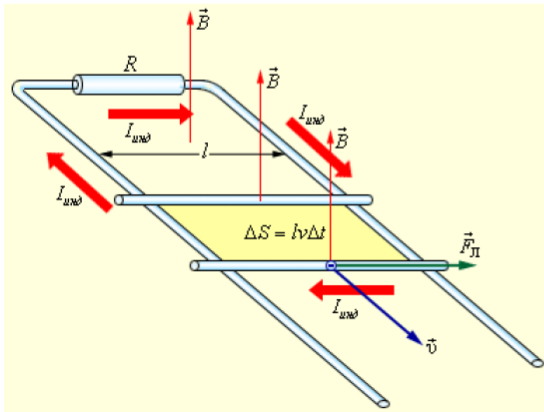


Рис.2.15. Возникновение ЭДС индукции

1. Пусть прямолинейный проводник длиной l перемещается с постоянной скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$.

2. За время Δt проводник перемещается пересекая поле на площади

$$\Delta S = \ell v \Delta t,$$

при этом изменение магнитного потока составляет

$$\Delta \Phi_m = B \Delta S.$$

3. Рассмотрим бесконечно малое перемещение проводника за время dt , когда магнитный поток изменяется на величину $d\Phi_m$, при этом будет совершаться работа, величина которой с учётом правила Ленца запишется следующим образом

$$\delta A = -I_{\text{инд}} d\Phi_m.$$

4. Поскольку в уравнение работы входит величина индукционного тока, то очевидно, что она связана с перемещением носителей зарядов. Движение зарядов может возникать только при возникновении внутри проводника электрического поля. Для рассматриваемого случая справедливо соотношение

$$\varepsilon_i I_{\text{инд}} dt = -I_{\text{инд}} d\Phi_m.$$

Разделим уравнение на $I_{\text{инд}} dt$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Уравнение представляет собой математическое выражение закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея: ЭДС индукции численно равно скорости изменения магнитного потока, взятой с обратным знаком (правило Ленца).

2.16. Какой максимальный заряд обнаруживается на обкладках конденсатора в идеальном колебательном контуре, частота незатухающих колебаний которого $\nu = 10^4$ Гц при амплитудном значении силы тока $i_m = 10^{-2}$ А?

Решение

1. Предположим, что заряд конденсатора в колебательном контуре меняется по синусоидальному закону

$$q(t) = q_m \sin \omega t; \quad \frac{dq}{dt} = i = q_m \omega \cos \omega t; \quad i = i_m \quad \text{при} \quad \cos \omega t = 1;$$

2. Амплитудное значение силы тока в контуре описывается уравнением:

$$i_m = q_m \omega = q_m 2\pi \nu;$$

3. Откуда максимальный заряд определится как:

$$q_m = \frac{1}{2\pi} \frac{i_m}{\nu} = \frac{1}{2\pi} 10^{-6} \text{ Кл};$$

2.17. Чему равен угол падения светового луча в воздухе на поверхность воды, если угол между преломлённым и отражённым лучами равен 90° ?

Решение

1. Как видно из построений хода лучей

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi,$$

откуда

$$\gamma = \pi - \beta - \alpha;$$

2. С учётом заданного значения угла $\beta = \pi/2$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha;$$

3. По закону преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n;$$

4. Из уравнения для γ находим

$$\sin \gamma = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \cos \alpha;$$

5. Перепишем закон преломления в виде

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = n; \quad n = 1,33; \quad \alpha = \operatorname{arctg} 1,33 \cong 53^\circ$$

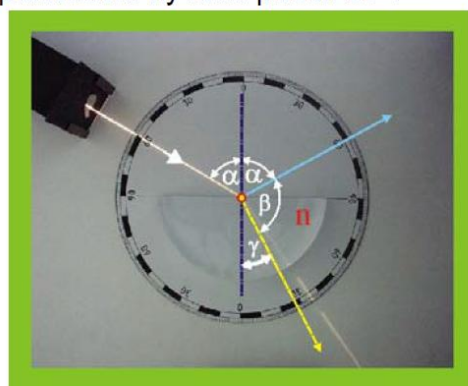


Рис. 2.17. Падение луча из воздуха на воду

2.18. Каким образом в лабораторных условиях можно получить когерентные волны?

Решение

1. Явление интерференции волн светового диапазона наблюдается только в случае распространения в одном объёме когерентных волн. Запишем условие когерентности двух световых волн

$$\omega = \omega_1 = \omega_2; \quad \lambda = \lambda_1 = \lambda_2; \quad \delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \text{const},$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота, λ – длина волны, δ – разность фаз колебаний.

2. Интерференция в двух световых пучках будет иметь место, если составляющие их волны будут иметь одинаковую частоту, что определит и одинаковость их длин волн $\lambda = c/\nu$.

3. Когерентные волны, как правило, **получаются путём деления световых волн** излучаемых одним источником, например с помощью зеркал Френеля (рис. 2.18).

4. Зеркала, имеющие большой угол между отражательными поверхностями дают два мнимых изображения S^* и S^{**} волновые поля которых удовлетворяют условию когерентности. Пучки света одинаковой частоты и фиксированной разности фаз пересекаются, взаимно усиливая и ослабляя друг друга, в разных точках пространства.

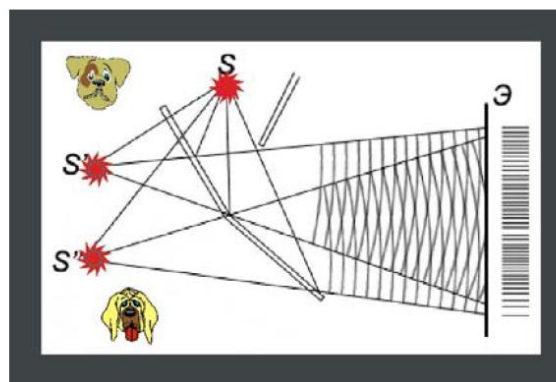


Рис. 2.18. Когерентные волны

2.19. В электронагревателе, через который течёт ток постоянной силы, за время t выделяется количество теплоты Q . Как изменится количество выделяемого тепла, если не меняя силу тока, увеличить вдвое время протекания тока и сопротивление?

Решение

1. Если на концах неподвижного проводника, нагревательного элемента в частности, имеется разность потенциалов $U = (\varphi_2 - \varphi_1)$, то электрический заряд Δq , перемещаясь из точки 2 с большим потенциалом, в точку 1, с меньшим потенциалом теряет часть своей энергии на преодоление сопротивления

$$dW = dq \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = dq \cdot U.$$

2. Заряд можно выразить через силу тока и время

$$I = \frac{dq}{dt}, \Rightarrow dq = Idt,$$

энергия с учётом этого запишется так

$$dW = IUdt.$$

3. Вполне резонен вопрос: «Куда девается эта энергия?». В кинетическую энергию она явно не переходит, т.к. никаких движений в макроскопическом варианте не возникает. В неподвижном проводнике движущиеся носители заряда сталкиваются с ионами металла и, отдавая им энергию, повышают тем самым температуру проводника. Это было замечено и экспериментально, что всякий проводник, по которому течёт ток, имеет температуру выше окружающей среды.

4. Другими словами, носители заряда, получая энергию от электрического поля, часть её расходуют на нагревание проводника, таким образом, работа, производимая при перемещении заряда, имеет вполне определённый тепловой эквивалент

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} IUdt.$$

5. Если сила тока и разность потенциалом во времени не меняются, то уравнение выделяемого тепла упрощается

$$\Delta Q = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

6. Уравнение выражает собой закон Джоуля – Ленца. Этот закон установлен был в 1841г. Дж. Джоулем и в 1842 г. независимо, Эмилем Христофоровичем Ленцем, профессором Петербургского университета.

7. Таким образом, если сопротивление и время увеличить вдвое, **то количество выделенного тепла вырастет в четыре раза**

$$Q_1 = I^2 R t; \quad Q_2 = I^2 2R \cdot 2t; \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = 4;$$

2.20. Какова масса фотона имеющего длину волны $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-10}$ м

Решение

1. Фотон, распространяющийся со скоростью света $c \cong 3 \cdot 10^8$ м/с обладает, как и всякая электромагнитная волна энергией, следовательно, ему можно при-

писать понятие массы. Запишем энергию фотона уравнением Планка и Хевисайда

$$\varepsilon_f = h\nu; \quad \varepsilon_f = m_f c^2; \quad \Rightarrow \quad m_f = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda};$$

2. Подставим: $h \cong 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-10}$ м

$$m_f = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-10}} \cong 8,8 \cdot 10^{-33} \text{ кг};$$

2.21. Если полная энергия электрона в атоме увеличилась на $\Delta\varepsilon = 3 \cdot 10^{-19}$ Дж, то фотон с какой длиной волны электрон поглотил?

Решение

1. Увеличение энергии электрона происходит при поглощении им фотона. Величина изменения энергии электрона должна быть равна энергии фотона

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{\Delta\varepsilon} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-19}} \cong 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

2.22. Какой прибор: спектрограф, счётчик Гейгера, лазер или камера Вильсона используется для регистрации α – частиц?

Решение

1. α – частица представляет собой дважды ионизированный атом гелия, её положительный заряд по модулю составляет два заряда электрона, в состав α – частицы входят два протона и два нейтрона, масса альфа-частицы составляет $m_\alpha \cong 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг.

2. Из перечисленных в условии задачи устройств спектрограф и лазер можно отбросить сразу. Остаются счётчик Гейгера и камера Вильсона.

3. Счетчик Гейгера – Мюллера представляет собой газоразрядный прибор для автоматического подсчёта числа попавших в него ионизирующих частиц. По сути это газонаполненный конденсатор, который пробивается при пролёте ионизирующей частицы через объём газа. изобретён в 1908 году Хансом Гейгером.

4. Работа счетчика основана на ударной ионизации. γ – кванты, испускаемые радиоактивным изотопом, попадая на стенки счетчика, выбивают из него электроны. Электроны, двигаясь в газе и сталкиваясь с атомами газа, выбивают из атомов электроны и создают положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между катодом и анодом ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счетчик резко возрастает. Другими словами этот прибор предназначен для исследования γ – излучения, т.е. высокоэнергетических электромагнитных волн

5. Принцип действия камеры Вильсона использует явление конденсации перенасыщенного пара в жидкости, находящейся в метастабильном состоянии: при появлении в среде перенасыщенного пара каких-либо центров конденсации (в частности, ионов, сопровождающих след быстрой заряженной α – частицы) на них образуются мелкие капли жидкости. Эти капли достигают значительных размеров и могут быть сфотографированы (рис. 2.22).



Рис. 2.22. Следы частиц в камере Вильсона

та или эфира. Пары тщательно очищены от пыли, чтобы до пролёта частиц у молекул воды не было центров конденсации. Когда поршень опускается, то за счет адиабатического расширения пары охлаждаются и становятся перенасыщенными. Заряженная частица, проходя сквозь камеру, оставляет на своем пути цепочку ионов. Пар конденсируется на ионах, делая видимым след частицы.

8. Камера Вильсона наиболее подходящий инструмент для исследования поведения α – частиц в магнитном поле. По трекам частиц, используя уравнение силы Лоренца можно вычислять кинематические и динамические параметры заряженных частиц.

6. В 1927 г. советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру в сильное магнитное поле, искривляющее треки, для исследования количественных характеристик частиц (например, массы и скорости).

7. Камера Вильсона представляет собой ёмкость со стеклянной крышкой и поршнем в нижней части, заполненная насыщенными парами воды, спирта или эфира.

2.23. Чему равна величина задерживающего потенциала, при которой прекратится фоток, если работа выхода электрона из катода $A = 3$ эВ, энергия световых квантов $\varepsilon_f = 6$ эВ?

Решение

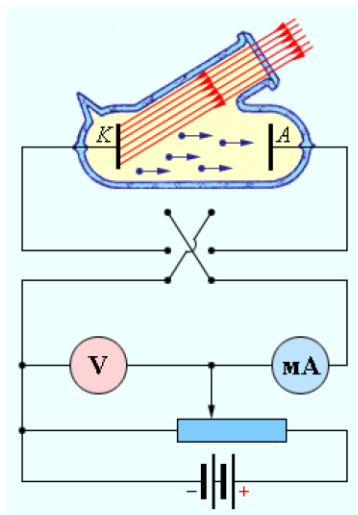


Рис. 2.23. Установка для исследования фотоэффекта

1. Квантовую гипотезу Планка к фотоэффекту, открытому в 1872 г. русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым, применил Генрих Герц.

2. В его экспериментах свет падал на цезиевый металлический катод (рис. 2.23), помещённый в откачанную стеклянную колбу с кварцевым окном. При падении на катод света в цепи начинал протекать ток, законы изменения которого и подлежали исследованию.

Герц, следом за Столетовым, установил, что интенсивность света влияет лишь на количество вылетающих электронов, а их скорость, вопреки здравому классическому смыслу, зависит исключительно от частоты падающего света. Герц

справедливо предположил, что кинетическая энергия вылетающего электрона равна

$$W = \frac{m_e v^2}{2} = h\nu.$$

3. Таким образом, при фотоэффекте изменение энергии атомной системы связано с частотой падающей световой волны соотношением

$$h\nu = W_1 - W_2.$$

4. Альберт Эйнштейн, ознакомившись с работами Герца, оформил полученные им результаты в виде закона своего имени

$$h\nu = \frac{m_e v^2}{2} + A,$$

где A – работа выхода электрона из металла.

5. Уравнение Генриха Герца для задерживающего потенциала можно переписать следующим образом:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU; \Rightarrow \varepsilon_f = eU + A; \quad U = \frac{\varepsilon_f - A}{e} \cong \frac{(6-3)1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 3\text{В};$$

2.24. Дана зависимость фототока в фотоэлементе от приложенного к нему напряжения. Как изменится график, если начать уменьшать частоту падающего на катод света?

Решение

1. Уменьшение частоты световых волн, падающих на фотокатод, приведёт к уменьшению энергии фотонов, составляющих излучение

$$\varepsilon_f = h\nu;$$

2. Величина запирающего напряжения соответствует равенству нулю кинетической энергии выходяемых электронов:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_3; \Rightarrow \varepsilon_f = eU_3 + A; \quad U_3 = \frac{\varepsilon_f - A}{e};$$

3. Таким образом, при уменьшении частоты падающего света, будет уменьшаться величина запирающего напряжения, т.е. точка соответствующая U_3 будет перемещаться по оси напряжений вправо.

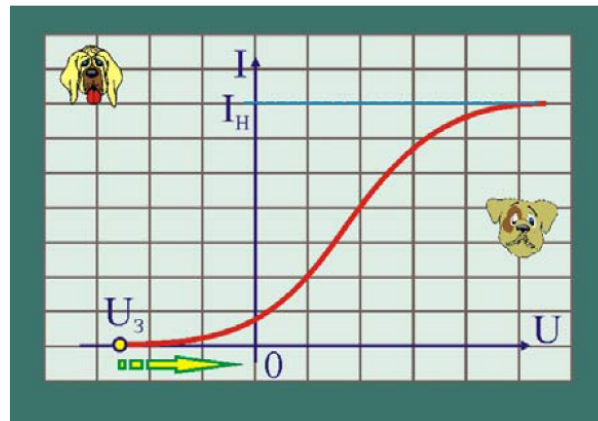


Рис. 2.24. Зависимость $I = f(U)$

2.25. Вода объемом $V = 100$ мл находится при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Какое количество тепла необходимо подвести к воде, чтобы довести её температуру до точки кипения при нормальных условиях?

Решение

1. Определим массу воды

$$m = \rho V = 10^3 \cdot 10^{-4} = 0,1\text{кг};$$

2. Принимая удельную теплоёмкость воды $C_y \cong 4200$ Дж/кг·К, температуру кипения воды $t_0 \cong 100^\circ\text{C}$, определим требуемое количество тепла

$$Q = C_y m \Delta T = 4200 \cdot 0,1 \cdot 80 = 3,36 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 33,6\text{кДж};$$