

**Камчатский государственный технический университет**

**А. Исаков**

**Физика**

**Решение задач ЕГЭ**

**Часть 2**

---

**Петропавловск-Камчатский  
2012**

УДК 50(075.8)  
ББК 20я73  
И85

Рецензент  
доктор физико-математических наук,  
профессор Дальневосточного Федерального университета  
Стоценко Л.Г.

**Исаков Александр Яковлевич**

И85      Физика. Решение задач ЕГЭ. Часть 2: КамчатГТУ, 2012. – 214 с.

Приведены решения задач заимствованных из оптимального банка заданий (В.А. Орлов, М.Ю. Демидова, Г.Г. Никифоров, Н. К. Ханнанов: М. – Интеллект-Центр, 2012).

Решения некоторых задач сопровождаются подробными теоретическими обоснованиями получаемых результатов.

Материалы настоящего сборника могут быть полезны старшеклассникам, студентам первых курсов колледжей при самостоятельной подготовке к испытаниям по элементарной физике в формате ЕГЭ.

## Оглавление

1. Кинематика .....	4
2. Динамика .....	11
3. Законы сохранения в механике .....	24
4. Механические колебания и волны .....	34
5. Молекулярная физика и термодинамика .....	38
6. Электростатика .....	72
7. Постоянный ток .....	87
8. Магнитное поле .....	97
9. Электромагнитные колебания и волны .....	113
10. Геометрическая оптика .....	121
11. Волновая оптика .....	130
12. Специальная теория относительности .....	138
13. Элементы квантовой механики и атомной физики .....	144
14. Элементы физики атомного ядра .....	160
15. Методы научного познания .....	179
16. Тренировочное задание № 1 .....	193
17. Тренировочное задание № 2 .....	205

## 1. Кинематика

1. Два автомобиля движутся по прямой дороге в одном направлении: один со скоростью  $v_1 = 40$  км/ч, а другой – со скоростью  $v_2 = 60$  км/час. При этом они:  
 1) сближаются; 2) удаляются; 3) не изменяют расстояния друг от друга; 4) могут сближаться, а могут и удаляться.

### Решение

4. Автомобили могут как удаляться друг от друга так и сближаться, в зависимости от последовательности движения. Если впереди авто с  $v_2 = 60$  км/ч, то имеется увеличение расстояния, если первым будет двигаться автомобиль с  $v_1 = 40$  км/ч, то они вначале станут сближаться, пока скоростной автомобиль не обгонит, затем снова станут удаляться.

2. Лодка должна попасть на противоположный берег по кратчайшему пути в системе отсчёта, связанной с берегом. Скорость реки  $u$ , скорость лодки относительно воды  $v > u$ . Найти модуль скорости лодки относительно берега.

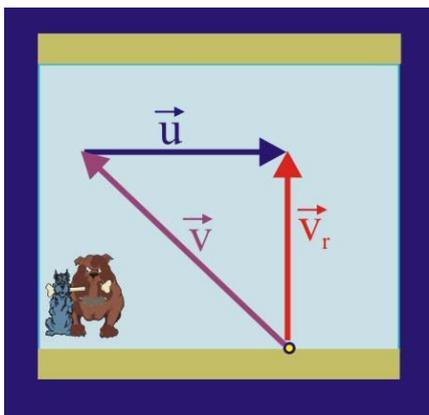


Рис. 2. Относительная скорость

### Решение

1. Чтобы попасть кратчайшим путём на противоположный берег лодка должна двигаться под некоторым углом к кратчайшей линии, соединяющей берега, чтобы компенсировать снос течением реки.

2. Из образованного прямоугольного треугольника скоростей следует, что:

$$v_r = \sqrt{v^2 - u^2};$$

3. Четыре тела движутся вдоль оси ОХ. Приведена зависимость проекций скорости этих тел от времени  $v_x = f(t)$ . Какое из тел движется с наименьшим ускорением?

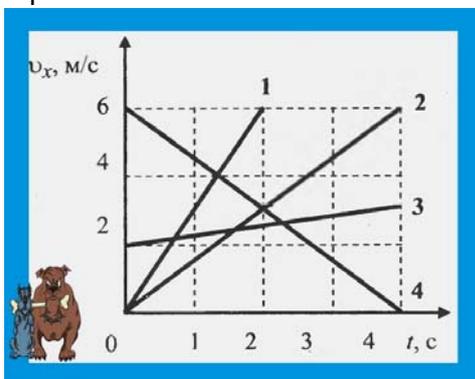


Рис. 3. Зависимости  $v_x = f(t)$

### Решение

1. Среднее ускорение

$$\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t};$$

2. Для тел 1, 2, и 4 модуль изменения скорости равен  $\Delta v_x = 6$  м/с, следовательно

$$a_{x(1)} = \frac{6}{2} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad a_{x(2)} = \frac{6}{5} = 1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$a_{x(4)} = \frac{-6}{5} = -1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

3. Для тела 3 изменение скорости составляет  $\Delta v_{x(3)} = 1$  м/с, поэтому

$$a_{x(\min)} = \frac{\Delta v_{x(3)}}{\Delta t_3} = \frac{1}{6} \cong 0,17 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

4. Точка движется с постоянной по модулю скоростью  $v$  по окружности радиуса  $R$ . Как изменится центростремительное (нормальное) ускорение точки, если её скорость увеличить вдвое, а радиус окружности вдвое уменьшить?

**Решение**

1. Составим систему уравнений и сравним нормальные ускорения

$$\left. \begin{aligned} a_{n(1)} &= \frac{v^2}{R}; \\ a_{n(2)} &= \frac{(2v)^2}{\frac{R}{2}}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{a_{n(2)}}{a_{n(1)}} = 8;$$

5. Задан график зависимости скорости прямолинейного движения автомобиля  $v$  от времени  $t$ . Найти путь, пройденный автомобилем за  $\tau = 5$  с.

**Решение**

1. Участок 1, равноускоренного движения автомобиля

$$x_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{10 \cdot 1}{2} = 5\text{м};$$

2. Участок 2, равномерного движения

$$x_2 = v_1 t_2 = 10 \cdot 2 = 20\text{м};$$

3. Последний, 3 участок равнозамедленного движения

$$x_3 = v_1 t_3 - \frac{a_3 t_3^2}{2} = 20 - \frac{5 \cdot 4}{2} = 10\text{м};$$

4. Пройденный за время  $\tau = 5$  с путь

$$s = x_1 + x_2 + x_3 = 35\text{м};$$

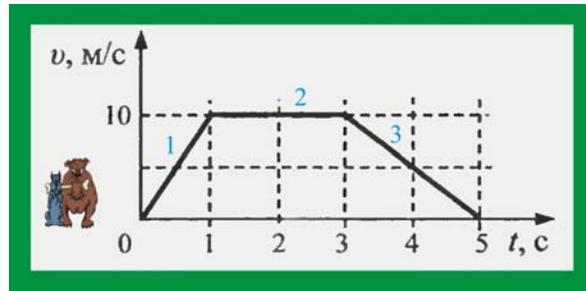


Рис.5. Зависимость скорости от времени

6. Вертолёт равномерно поднимается вертикально вверх. Какова траектория движения точки на конце лопасти винта в системе отсчёта, связанной с корпусом вертолёт?

**Решение**

1. Относительно системы отсчёта, связанной с корпусом все точки машины, кроме точек, принадлежащих лопастям, будут покоиться, а все точки, лежащие на лопастях, будут двигаться по круговым траекториям.

2. Если систему отсчёта связать с землёй, то все точки машины будут двигаться прямолинейно, а точки пропеллера – по спирали, причём шаг спирали будет определяться скоростью подъёма  $u$ .

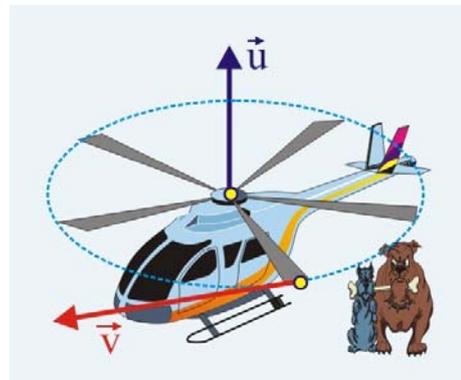


Рис. 6. Вертикальный взлёт

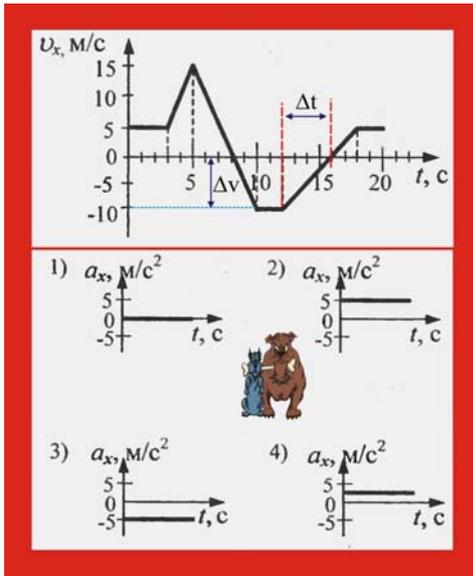


Рис. 7. Зависимости скорости и ускорения от времени

7. Дан график зависимости проекции скорости от времени. Выбрать верную зависимость проекции ускорения тела в интервале времени от 12 до 16 с.

**Решение**

1. В заданном промежутке времени  $\Delta t = 4$  с проекция скорости меняется от  $-10$  м/с до  $0$ , следовательно, ускорение в этом интервале времени будет положительным, т.к. скорость увеличивается и будет равным:

$$a_{x(12-16)} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{10}{4} = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

2. Из приведенных графиков зависимости проекций ускорения от времени правильным является зависимость № 4.

8. Шарик брошен вертикально вверх с начальной скоростью  $\vec{v}$ . Установите соответствие между графиками и физическими величинами, зависимости которых от времени эти графики могут представлять ( $t_0$  – время полёта). Каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу, выбранные цифры под соответствующими буквами.

ГРАФИКИ	ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ
<p>А) </p> <p>Б) </p>	<p>1) координата шарика <math>y</math></p> <p>2) проекция скорости шарика <math>v_y</math></p> <p>3) проекция ускорения шарика <math>a_y</math></p> <p>4) модуль силы тяжести, действующий на шарик</p>

Рис. 8. Графики и физические величины

**Решение**

А	Б
2	3

1. Уравнения проекции шарика на вертикальную ось при подъёме в высшую точку траектории и падении в точку старта

$$v_{y(1)} = v - gt; \quad v_{y(2)} = gt;$$

2. Модули начальной скорости и конечной скорости в отсутствие сопротивления будут одинаковы, а направление векторов будет противоположным, смена направления скорости будет происходить в верхней точке траектории по прошествии времени  $\tau = t_0/2$ . График А соответствует проекции скорости шарика на вертикальную ось.

3. Если вертикальная ось направлена вертикально вверх, то ускорение свободного падения, оставаясь постоянным, будет во всё время полёта иметь отрицательную проекцию, что соответствует графику Б.

9. Камень бросают под углом  $\alpha$  к горизонту. На какую максимальную высоту поднимется камень, если ровно через  $\tau = 1$  с после броска его скорость была направлена горизонтально?

### Решение

1. Тело, брошенное в поле земного тяготения с начальной скоростью  $v_0$ , направленной под углом  $\alpha$  к горизонту будет двигаться по криволинейной траектории, лежащей в плоскости, перпендикулярной поверхности земли. Существенно отметить, движение протекает при постоянном по модулю и направлению ускорении  $\vec{g}$ . Это даёт возможность разложить криволинейное движение на два более простых: равномерное вдоль горизонтальной оси т.к.  $g_x = 0$  и ускоренное по вертикальной оси, где проявляется двойко ускорение свободного падения (рис. 9).

2. Движение исследуемого тела относительно вертикальной оси из начальной точки  $O$  в точку  $C$  – равнозамедленное, а из точки  $C$  в точку  $B$  – равноускоренное с ускорением свободного падения  $\vec{g}$ . В начальный момент времени при  $t = 0$  имеем:  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$ ,  $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$ ,  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ .

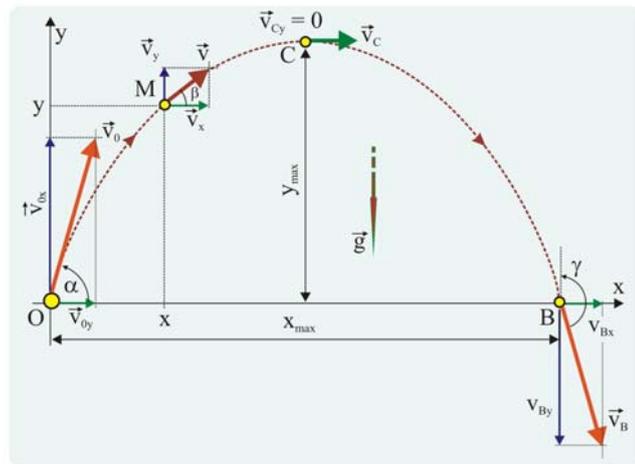


Рис. 9. Тело, брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту

3. Для проекций скорости в любой момент времени, например в точке  $M$ , движения можно записать следующие уравнения

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cos \alpha, \\ v_y(t) = v_0 \sin \alpha - gt. \end{cases}$$

4. Модуль вектора скорости определится как

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0 \sin \alpha - gt)^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0^2 \sin^2 \alpha - 2v_0 \sin \alpha gt + g^2 t^2)},$$

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_0^2 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) - 2v_0 gt \sin \alpha + g^2 t^2}.$$

5. Положение вектора скорости определим, используя свойства прямоугольного треугольника, построенного на векторе скорости и его проекциях

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{|\vec{v}_y|}{|\vec{v}_x|}, \quad \Rightarrow \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

6. Уравнения движения запишем, используя особенности равномерного перемещения точки по горизонтали и равноускоренного по вертикали

$$\begin{cases} x(t) = v_0 t \cos \alpha, \\ y(t) = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \end{cases}$$

7. Время подъёма тела в верхнюю точку траектории  $C$  определим, используя второе уравнение исходной системы при условии:  $v_y = 0$

$$v_0 \sin \alpha - gt_c = 0, \Rightarrow t_c = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}; \Rightarrow v_0 \sin \alpha = gt_c.$$

8. Подставим значение  $v_0 \sin \alpha$  в уравнение вертикальной координаты

$$y_c = gt_c - \frac{gt_c^2}{2} = 5 \text{ м};$$

10. Тело бросили с балкона вертикально вверх. Система отсчёта связана с поверхностью Земли, ось OX направлена вертикально вверх. Установите соответствие между физическими величинами и характером их изменения в ходе полёта до поверхности Земли. Каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ
А) координата	1) постоянно возрастает
Б) проекция вектора скорости	2) постоянно убывает
В) проекция вектора ускорения	3) остается неизменной
	4) сначала возрастает, затем убывает

Рис. 10.1. Условия совместимости при вертикальном броске с балкона

А	Б	В
4	2	3

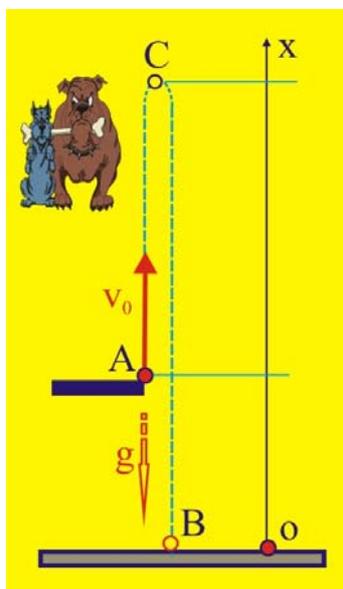


Рис. 10.2. Вертикальный бросок с балкона вверх

### Решение

1. Координата тела на отрезке траектории AC возрастает, в точке C тело останавливается, координата достигает максимального значения и далее при свободном падении на Землю (CB) уменьшается до нуля.

2. Проекция скорости на отрезке AC убывает от  $v_0$  до нуля, в точке C меняет свой знак и далее, по отношению к выбранной оси остаётся отрицательной.

3. Все этапы движения протекают под действием ускорения свободного падения  $\vec{g}$ , которое остаётся постоянным и не зависит от прочих кинематических характеристик движения.

11. Тело брошено вертикально вверх. Через  $\tau = 0,5$  с после броска его скорость стала равной  $v = 20$  м/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определить начальную скорость тела.

### Решение

1. Кинематические уравнения движения

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= v_0 t - \frac{gt^2}{2}; \\ v_y(t) &= v_0 - gt; \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_0 = v_y + gt = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

12. Какой путь пройдёт свободно падающее из состояния покоя тело за шестую секунду своего падения?

**Решение**

1. Путь, пройденный телом за первые шесть секунд свободного падения

$$y_6 = \frac{gt_6^2}{2} = 180 \text{ м};$$

2. Путь, пройденный телом, за первые пять секунд свободного падения

$$y_5 = \frac{gt_5^2}{2} = 125 \text{ м};$$

3. Путь, пройденный за шестую секунду падения

$$s_6 = y_6 - y_5 = 55 \text{ м};$$

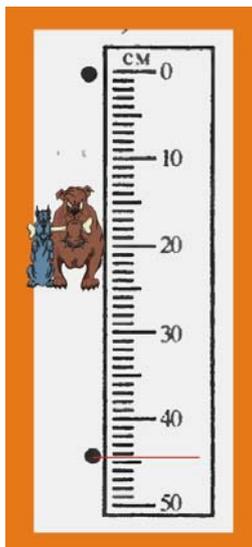


Рис. 13. Стробоскоп

13. Специальный фотоаппарат зафиксировал два положения падающего в воздухе из состояния покоя шарика: в начале падения и через  $\tau = 0,31$  с. Определить приблизительное значение ускорения свободного падения.

**Решение**

1. Путь, пройденный шариком в его свободном падении без учёта сопротивления со стороны среды

$$y = \frac{gt^2}{2};$$

2. По заданному положению шарика относительно линейки определим пройденный за  $\tau = 0,31$  с путь и подставим это значение в уравнение движения, которое затем разрешим относительно  $g$  ( $y \cong 0,445$  м)

$$g \cong \frac{2y}{\tau^2} \cong 9,26 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

14. Находящемуся на горизонтальной поверхности стола бруску сообщили скорость  $v_0 = 5 \text{ м/с}^2$ . Под действием сил трения брусок движется с ускорением  $a = 1 \text{ м/с}^2$ . Чему равен путь пройденный бруском за время  $\tau = 6$  с?

**Решение**

1. Определим скорость тела через  $\tau = 6$  с после начала движения

$$v_6 = v_0 - a\tau = -1 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

значит, в заданное время тело двигалось в обратную сторону, естественно после остановки. Поскольку об обратном движении ничего не говорится в условии, то движение будет продолжаться некоторое время  $t_0 < \tau$ .

2. Определим время до остановки

$$v = v_0 - at_0; \quad v = 0; \quad \Rightarrow \quad t_0 = \frac{v_0}{a} = 5 \text{ с};$$

3. Путь, пройденный до остановки

$$x = v_0 t_0 - \frac{at_0^2}{2} = 12,5 \text{ м};$$

15. Установите соответствие между техническими устройствами (приборами) и физическими закономерностями, лежащими в основе принципа их действия. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРИБОР	ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
А) жидкостный термометр	1) зависимость гидростатического давления от высоты столба жидкости
Б) рычажные весы	2) условие равновесия рычага
В) пружинный динамометр	3) зависимость силы упругости от степени деформации тела
	4) объемное расширение жидкостей при нагревании
	5) изменение атмосферного давления с высотой



Рис. 15. Приборы и физические закономерности

А	Б	В
4	2	3

16. Автомобиль движется с постоянной по модулю скоростью по заданной на рис. 16 траектории. В какой из указанных точек траектории его нормальное (центростремительное) ускорение будет максимальным?

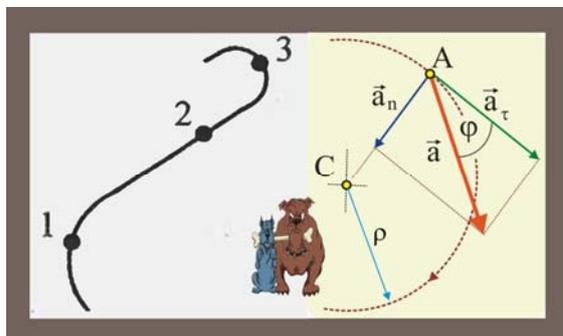


Рис. 16. Траектория

### Решение

1. Вектор ускорения криволинейно движущегося тела складывается из нормальной и тангенциальной составляющих

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau;$$

$$|\vec{a}| = \sqrt{\left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dt}\right)^2},$$

где  $\rho$  – радиус кривизны траектории.

2. В данном случае модуль скорости постоянен, поэтому,  $a_\tau = 0 \Rightarrow |\vec{a}| = |\vec{a}_n|$

3. Нормальная составляющая ускорения

$$a_n = \frac{v^2}{\rho},$$

другими словами ускорение при постоянстве модуля скорости будет больше в той точке траектории, где меньше радиус её кривизны, т.е. в точке 3.

---

17. Мальчик толкнул санки с вершины горки. Сразу после толчка санки имели скорость  $v_0 = 5$  м/с, а у подножия горки скорость возросла до  $v = 15$  м/с. Пренебрегая силами трения и сопротивления, определить высоту горки.

### Решение

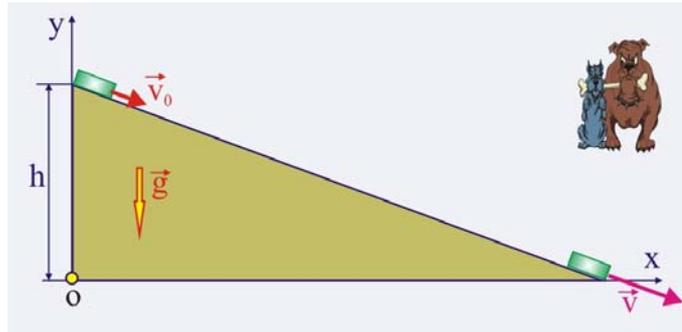


Рис. 17. Спуск санок по гладкой горке

1. В отсутствие всякого рода сопротивления, время спуска с горки высотой  $h$  будет равно времени свободного падения с этой высоты, потому что в обоих случаях действует одинаковое ускорение  $g$ . По горизонтальной оси движение будет равномерным, так как на горизонтальную ось проекция единственного ускорения равна нулю.

2. Запишем кинематические соотношения для движения санок относительно вертикальной оси

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 + gt; \\ h &= v_0 t + \frac{gt^2}{2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} t &= \frac{v - v_0}{g}; \\ h &= v_0 \frac{v - v_0}{g} + \frac{g (v - v_0)^2}{2g^2}; \end{aligned} \right\}$$

$$h = \frac{2vv_0 - 2v_0^2 + v^2 - 2vv_0 + v_0^2}{2g} = \frac{v^2 - v_0^2}{2g} = \frac{225 - 25}{20} = 10 \text{ м.}$$


---

18. Приведена фотография установки для исследования равноускоренного скольжения каретки (1) массой  $m = 0,1$  кг по наклонной плоскости с углом наклона к горизонту  $\alpha = 30^\circ$ . В момент начала движения верхний датчик (А) включает секундомер (2), а при прохождении каретки мимо нижнего датчика (В) секундомер выключается. Линейка градуирована с сантиметрах. Какое из приведенных ниже уравнений позволяет вычислить скорость каретки в любой момент времени?

- 1)  $v = 1,25t$ ; 2)  $v = 0,5t$ ; 3)  $v = 2,5t$ ; 4)  $v = 1,9t$ ;

## Решение

1. В приведенных формулах числовой коэффициент, исходя из теории размерностей, представляет собой ускорение, величину которого следует найти.

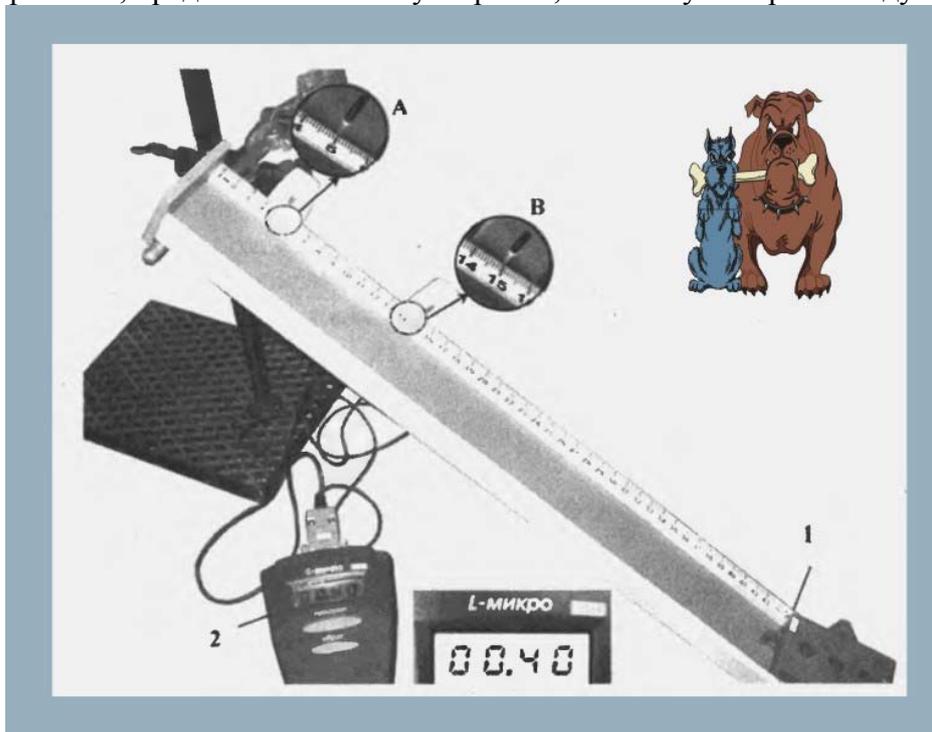


Рис. 18. Фотография экспериментальной установки

2. За время  $\tau = 0,4$  с каретка из прошла путь  $x = 0,1$  м, если считать, что движение началось из состояния покоя, то

$$x = \frac{a\tau^2}{2}; \Rightarrow a = \frac{2x}{\tau^2} = \frac{0,2}{0,16} = 1,25 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

что позволяет уравнение скорости записать в виде:

$$v = 1,25t;$$

---

## 2. Динамика

19. Поставьте в соответствие физическую величину и единицу её измерения в СИ. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА		ЕДИНИЦА ВЕЛИЧИНЫ
А) плотность		$\frac{м}{с^2}$
Б) ускорение		$\frac{кг \cdot м}{с^2}$
В) сила		$\frac{кг}{м^3}$

Рис. 19. Соответствие единиц измерения

### Решение

А	Б	В
3	1	2

20. Равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю. Какова траектория движения этого тела?

### Решение

1. В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = m\vec{a}; \quad \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = 0; \quad \Rightarrow \quad m\vec{a} = 0; \quad m \neq 0; \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = 0;$$

2. Ускорение может быть равно нулю только при прямолинейном равномерном движении, в случае любого криволинейного движения, даже с постоянной по модулю скоростью, непременно возникает нормальное ускорение.

21. Равнодействующая всех сил, действующих на тело равна нулю. Движется это тело или находится в состоянии покоя?

### Решение

1. Закон был сформулирован в 1638 г. Галилео Галилеем. Смысл закона в следующем: всякая материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока приложенные к ней силы, не изменят этого состояния. В современной терминологии первый закон Ньютона более доступен в следующем изложении: Если геометрическая сумма сил, действующих на материальную точку равна нулю, то эта точка, либо находится в покое, либо её скорость постоянна по модулю и направлению.

2. Математически закон записывается так:

$$\text{Если } \sum_{k=1}^{k=n} \vec{F}_k = 0, \text{ то } \begin{cases} \vec{v} = 0; \\ \vec{v} = \text{const.} \end{cases}$$

3. Система отсчёта относительно, которой выполняется закон инерции, называется инерциальной. При решении большинства технических задач в качестве инерциальных систем отсчёта используются системы, связанные с Землёй, при этом суточное движение вокруг собственной оси и годовое движение вокруг Солнца не учитывается. Хотя, строго говоря, пренебрежение вращением земли, в ряде задач, таких как ракетные пуски, артиллерийские стрельбы, движение гироскопических устройств, недопустимо. Если в качестве объектов рассматриваются планеты Солнечной Системы, то центр инерционной системы связывается с Солнцем и осями, проходящими через условно неподвижные звёзды.

22. Человек тянет за крючок динамометр с силой  $F = 60 \text{ Н}$ , другой крючок динамометра прикреплен к стене. Каковы показания динамометра?

### Решение

1. В соответствии с третьим законом ньютона сила, с которой динамометр действует на стену, равна и противоположно реакции связи, но эти силы приложены к разным телам, поэтому суммировать их нельзя. Динамометр будет показывать силу, соответствующую силе упругости пружины при её растяжении, т.е. 60 Н.

23. На рис. 1 представлены направления векторов скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{a}$  мяча в инерциальной системе отсчёта. Какое из приведенных на рис. 2 направлений имеет вектор равнодействующих всех сил  $\vec{F}$ , приложенных к мячу?

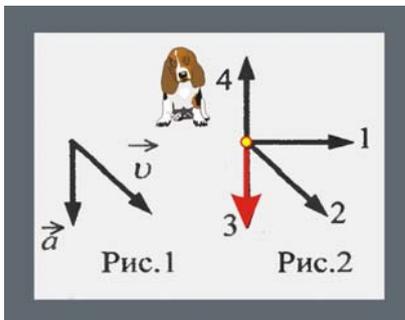


Рис. 23. Равнодействующая

вниз.

### Решение

1. В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = m\vec{a},$$

т.е. равнодействующая (геометрическая сумма) всех сил должна быть направлена так же, как и вектор ускорения, в данном случае, вертикально

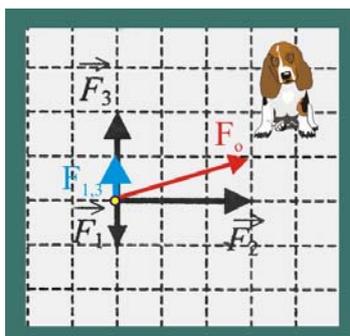


Рис. 24. Равнодействующая

24. На тело, находящееся на горизонтальной плоскости, действуют 3 горизонтальные силы. Каков модуль равнодействующей этих сил, если  $F_1 = 1 \text{ Н}$ ?

### Решение

1. Сумма вертикальных сил

$$F_{1,3} = F_3 - F_1 = 1\text{Н};$$

2. Геометрическую сумму сил  $F_{1,3}$  и  $F_2$  опреде-

лим по правилу параллелограмма

$$|\vec{F}_0| = \sqrt{F_{1,3}^2 + F_2^2} = \sqrt{10}\text{Н};$$

25. Мимо Земли летит астероид в направлении, показанном пунктирной стрелкой. Вектор  $\vec{F}_A$  показывает силу притяжения астероида Землёй. Вдоль какой стрелки (1, 2, 3 или 4) направлена сила, действующая на землю со стороны астероида?

**Решение**

1. Закон гравитационного взаимодействия Ньютона

$$\vec{F}_G = G \frac{Mm}{r^3} \vec{r},$$

устанавливает, что силы взаимодействия, равны по модулю, противоположны по направлению и линии их действия совпадают и проходят через центры масс взаимодействующих тел. Этим условиям удовлетворяет только вектор 3.

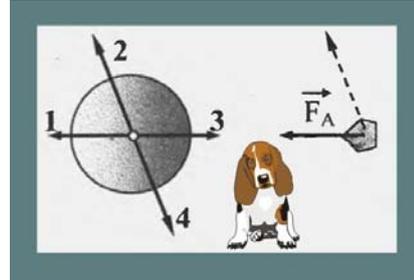


Рис. 25. Притяжение астероида

26. В результате перехода с одной орбиты на другую нормальное (центростремительное) ускорение спутника Земли уменьшается. Как изменяются в результате этого перехода радиус орбиты спутника, его скорость движения по орбите и период обращения вокруг Земли?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

**Решение**

Радиус орбиты	Скорость движения по орбите	Период обращения вокруг Земли
1	2	3

1. Условие нахождения спутника на стационарной круговой орбите

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}; \quad G \frac{M}{r^2} = a_n,$$

т.к. гравитационная постоянная  $G$  и масса Земли  $M$ , величины постоянные, то уменьшение  $a_n$  происходит за счёт увеличения радиуса орбиты  $r$ .

2. Из условия стационарности орбиты

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}; \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

при увеличении радиуса орбиты скорость при постоянстве  $G$  и  $M$  должна уменьшаться.

3. Период обращения не должен изменяться потому что:

$$v = \omega r = \frac{2\pi}{T} r; \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2\pi r}{v};$$

27. Коромысло весов, к которому подвешены на нитях два тела, находится в равновесии. Как нужно изменить массу первого тела, чтобы после увеличения плеча  $d_1$  в 3 раза равновесие сохранилось? Коромысло и нить считать невесомыми.

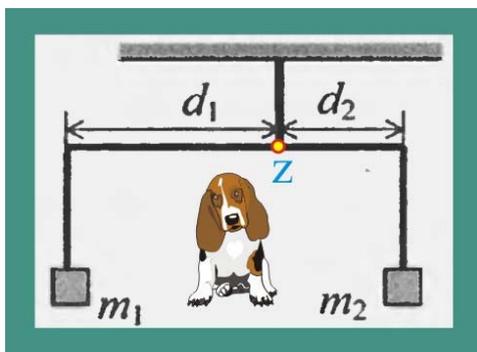


Рис.27. Равновесие тел

### Решение

1. Если через точку подвеса коромысла провести ось  $Z$  перпендикулярно плоскости чертежа, то для равновесия коромысла необходимо выполнение условия равенства нулю суммы моментов сил тяжести, приложенных к концам коромысла

$$\sum_1^2 M_Z(m_1\vec{g}; m_2\vec{g}) = 0;$$

$$mg_1d_1 = m_2gd_2; \quad m_1d_1 = m_2d_2;$$

2. После увеличения плеча  $d_1$  в три раза, для сохранения равновесия надо массу  $m_1$  уменьшить в три раза.

28. Масса Марса составляет 1/10 массы Земли, а расположен он в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Во сколько раз сила притяжения Земли к Солнцу больше притяжения Марса к Солнцу. Считать, что планеты движутся по круговым траекториям.

### Решение

1, Запишем для планет закон гравитационного взаимодействия Ньютона

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= G \frac{Mm_1}{r^2}; \\ F_2 &= G \frac{M \cdot 0,1m_1}{(1,5r)^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{1,5^2}{0,1} = 22,5,$$

где  $m_1$  – масса Земли,  $r$  – расстояние от Солнца до Земли.

29. Космический корабль после выключения ракетных двигателей движется вертикально вверх, достигает верхней точки траектории и затем движется вниз. На каком участке траектории наблюдается состояние невесомости? Сопротивление отсутствует.

### Решение

1. В космическом корабле вес тела это сила, с которой тело воздействует на горизонтальную опору. При вертикальном движении вес возникает за счёт ускорения, которое сообщается кораблю двигателями. Когда двигатели не работают, ускорение отсутствует, наблюдается состояние невесомости.

30. Космонавт на Земле притягивается к ней с силой  $F = 700$  Н. С какой приблизительно силой он будет притягиваться к Марсу, находясь на его поверхности, если радиус Марса в два раза меньше, чем Земли, а масса Марса – в 10 раз меньше, чем Земли?

### Решение

1. Сравнивая силы тяжести на Земле и на Марсе, найдём ускорение свободного падения на Марсе  $g_2$ , приняв для Земли  $g_1 \cong 10$  м/с<sup>2</sup>

$$\left. \begin{aligned} mg_1 &= G \frac{Mm}{R^2}; \\ mg_2 &= G \frac{10}{4} \frac{M}{R^2} m \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{g_1}{g_2} = \frac{10}{4}; \quad g_2 = 4 \frac{M}{c^2};$$

2. Сила притяжения космонавта массой  $m = 70$  кг на поверхности Марса  $mg_2 = 280$  Н.

31. Брусок лежит на шероховатой наклонной опоре. На него действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила упругости опоры (нормальная реакция связи)  $\vec{N}$  и сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ . Найти модуль равнодействующей сил  $\vec{F}_{\text{тр}}$  и  $\vec{N}$ , если брусок покоится.

### Решение

1. Модуль равнодействующей заданных двух сил ( $\vec{F}_{\text{тр}}, \vec{N}$ ) определим по правилу векторного сложения (по правилу параллелограмма)

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + N^2} = |m\vec{g}|,$$

равнодействующая по модулю будет равна силе тяжести и направлена в противоположную сторону. Состояние равновесия соответствует уравнению

$$mg \sin \alpha = F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \alpha; \quad \mu = \operatorname{tg} \alpha;$$

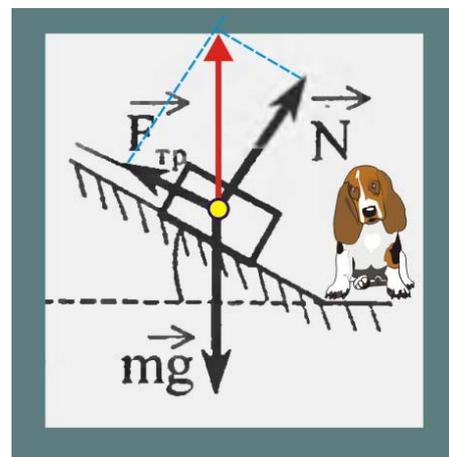


Рис. 31. Равновесие бруска

32. Результаты измерений, проведенных с двумя различными пружинами, с целью проверки закона Гука приведены в таблице:

$\Delta x$ , см	0	1	2	3	4	5
$F_1$ , Н	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$F_2$ , Н	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0

Какая серия опытов подтверждает закон Гука?

### Решение

1. Закон Гука связывает силу упругости  $F$  с коэффициентом жесткости пружины  $k$  и её деформацией  $\Delta x$

$$F = k\Delta x; \quad \Rightarrow \quad k = \frac{F}{\Delta x};$$

2. Для первой пружины во всех измерениях  $k_1 = 50$  Н/м, для второй пружины  $k_2 = 200$  Н/м, т.е. обе серии измерений могут служить подтверждением справедливости закона Гука.

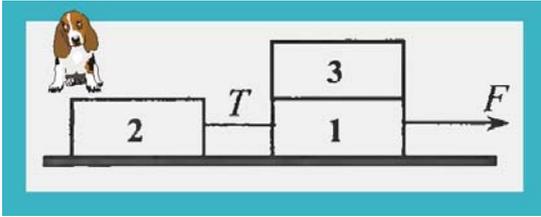


Рис. 33.1. Связанные бруски

33. Одинаковые бруски, связанные нитью, движутся под действием силы  $F$  по гладкой горизонтальной поверхности. Как изменится сила натяжения нити  $T$ , если третий брусок переложить с первого на второй?

### Решение

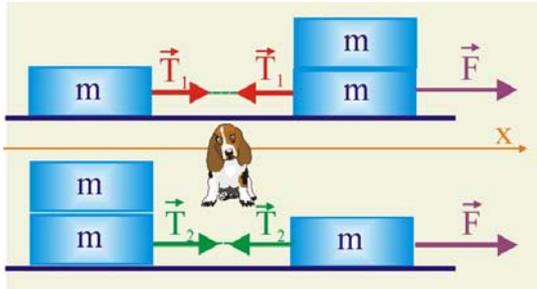


Рис. 33.2. Натяжение нити

1. В данном случае нить является связью, наложенной на бруски. Используя принцип освобождения, связи можно заменить их реакциями и рассматривать тела как свободные.

2. Левое тело верхнего фрагмента рис. 33.2 является свободным, находящимся под действием силы натяжения  $T_1$ , для него в проекции на ось  $X$  второй закон Ньютона запишется следующим образом:

$$T_1 = ma.$$

3. Если один из брусков переложить (нижний фрагмент рис. 33.2), то уравнение второго закона примет вид:

$$T_2 = 2ma,$$

т.е. натяжение нити увеличится в два раза.

34. Приведены графические зависимости модулей сил упругости от деформации двух пружин. Определить отношение их жёсткостей.

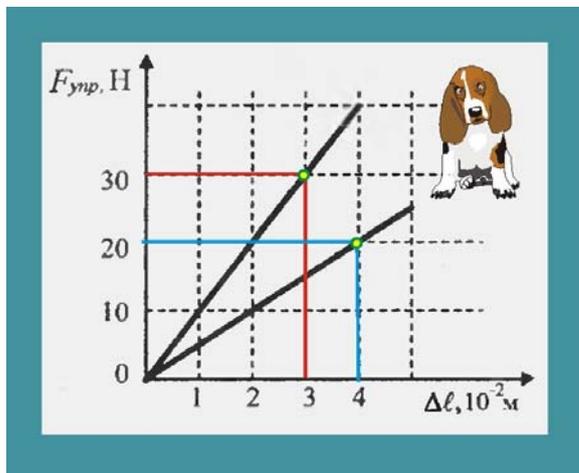


Рис.34. Силы упругости

### Решение

1. Поскольку представленные зависимости демонстрируют линейную зависимость силы упругости от деформации обеих пружин, коэффициенты их упругости можно записать, исходя из удобства вычислений, следующим образом:

$$k_1 = \frac{F_1}{\Delta l_1} = \frac{30}{3 \cdot 10^{-2}} = 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

$$k_2 = \frac{20}{4 \cdot 10^{-2}} = 500 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

т.е. жёсткости пружин отличаются в два раза.

7. Можно упростить поиск заданного отношения, для этого нужно определить отношение сил упругости при одинаковом удлинении пружин, например, рассмотреть величины сил при  $\Delta l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ,  $F_1 = 20 \text{ Н}$ ,  $F_2 = 10 \text{ Н}$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{F_1}{F_2} = 2;$$

35. На рис. 35 представлен график зависимости модуля силы трения  $F$  от модуля силы нормального давления  $N$ . Определить коэффициент трения скольжения.

**Решение**

1. В общем случае для тела, расположенного на горизонтальной поверхности

$$N = mg; \quad F = \mu N = \mu mg;$$

2. Из треугольника, построенного на силах, следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu = \frac{F}{N} = 0,25;$$

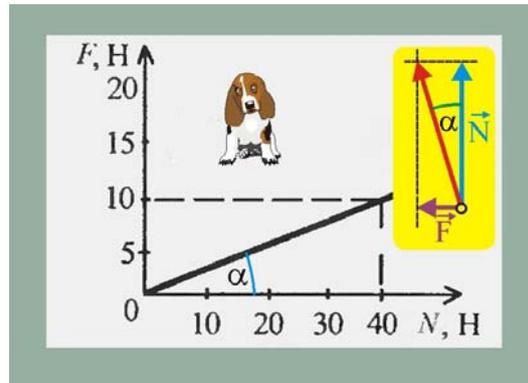


Рис. 35 Зависимость  $F = f(N)$

36. Деревянный брусок массой  $m$ , площади граней которого связаны отношением  $S_1:S_2:S_3 = 1:2:3$ , скользит равномерно и прямолинейно по горизонтальной шероховатой опоре, соприкасаясь с ней гранью  $S_1$ , под действием горизонтальной силы  $F$ . Определить коэффициент трения.

**Решение**

1. Поскольку тело под действием силы  $F$  движется равномерно, без ускорения, то второй закон Ньютона в проекции на горизонтальную ось представится следующим образом:

$$F - \mu mg = 0; \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{F}{mg};$$

37. На горизонтальном полу стоит ящик массой  $m = 10$  кг. Коэффициент трения между полом и ящиком  $\mu = 0,25$ . К ящику в горизонтальном направлении прикладывают силу  $F = 16$  Н. Какова сила трения между ящиком и полом?

**Решение**

1. Определим максимальное значение силы трения

$$F_{\text{Тр(max)}} = \mu mg = 25 \text{ Н};$$

2. Поскольку  $F_{\text{Тр(max)}} > F$ , то тело остаётся в покое, т.е. наблюдается равновесие между приложенной силой и силой трения

$$|F_{\text{Тр}}| = F = 16 \text{ Н};$$

38. Брусок скользит по наклонной плоскости вниз без трения. Что происходит при этом с его скоростью, потенциальной энергией, силой реакции наклонной плоскости?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась;
- 2) уменьшилась;
- 3) не изменилась.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры могут повторяться.

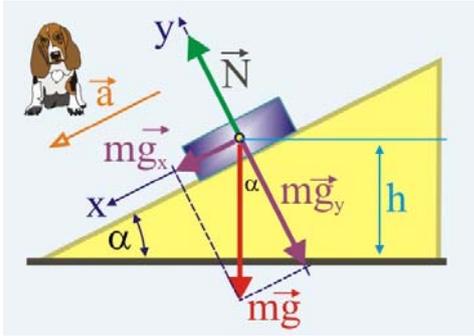


Рис. 38. Наклонная плоскость

наклонной плоскости, то

$$\Pi = mgh,$$

по мере спуска высота  $h$  будет уменьшаться, значит и потенциальная энергия, трансформируясь в кинетическую энергию так же будет уменьшаться.

3. Нормальная реакция связи плоскости

$$N = mg \cos \alpha,$$

все величины, определяющие  $N$  в процессе движения тела по наклонной плоскости не изменяются, поэтому  $N = \text{const}$ .

Скорость	Потенциальная энергия	Нормальная реакция связи плоскости
1	2	3

39. Задан график зависимости силы тяжести от массы тела для некоторой планеты. Определить ускорение свободного падения.

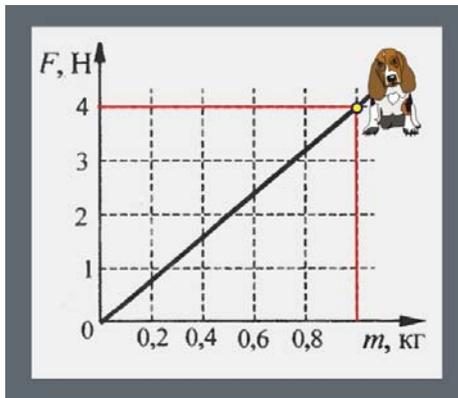


Рис. 39. Сила тяжести и масса

1. Закон гравитации Ньютона для поверхности планеты

$$G \frac{mM}{R^2} = F = mg;$$

2. Ускорение свободного падения на поверхности

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

3. Так как зависимость  $F = f(m)$  линейная, то выбор величин можно делать, исходя из удобства вычислений

$$g = \frac{4}{1} = 4 \frac{\text{М}}{\text{с}^2};$$

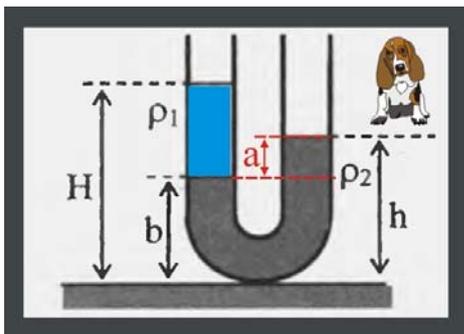


Рис. 40. Сообщающиеся сосуды

40. В широкую U-образную трубку с вертикальными прямыми коленами налиты: неизвестная жидкостью плотностью  $\rho_1$  и вода плотностью  $\rho_2 = 10^3 \text{ кг/м}^3$ . На рисунке  $b = 10 \text{ см}$ ,  $h = 24 \text{ см}$ ,  $H = 30 \text{ см}$ . Определить плотность  $\rho_1$ .

Решение

1. Необходимо записать условие равновесия столба жидкости с плотностью  $\rho_1$  вы-

сотой  $(H - b)$  и столба жидкости с плотностью  $\rho_2$  высотой  $(h - b)$

$$\rho_1 g(H - b) = \rho_2 g(h - b); \Rightarrow \rho_1 = \frac{\rho_2(h - b)}{H - b} = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

41. Груз массой  $m = 2$  кг, подвешенный на тонкой нити, целиком погружен в воду и не касается дна. Модуль силы натяжения нити  $T = 13$  Н. Определить объём груза.

### Решение

1. Тело находится под действием трёх сил: силы тяжести  $m\vec{g}$ , силы Архимеда  $\vec{F}_A$  и натяжения нити  $\vec{T}$ .

2. Сила натяжения нити в данном случае будет равна разности силы тяжести и силы Архимеда. Условие равновесия тела в проекции на вертикальную ось запишется следующим образом:

$$T = mg - \rho g V;$$

$$V = \frac{mg - T}{\rho g} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 (0,7 \text{ л});$$

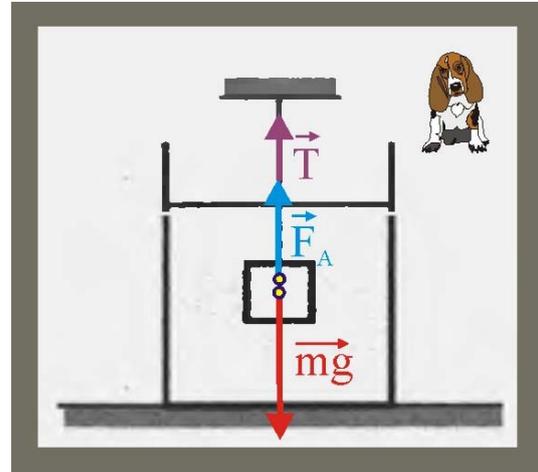


Рис. 41. Объём груза

42. При проведении эксперимента исследовалась зависимость модуля упругости пружины от её длины, которая выражалась формулой

$$F(\ell) = k|\ell - \ell_0|,$$

где  $\ell_0$  – длина недеформированной пружины. Какие из утверждений соответствуют результатам опыта?

- А. Длина пружины в недеформированном состоянии равна 7 см.
- Б. Жёсткость пружины равна  $k = 200$  Н/м.

### Решение

1. Длина недеформированной пружины, судя по графику равна  $\ell_0 = 3$  см, потому что именно при таком значении  $\ell$  на графике сила натяжения равна нулю. следовательно утверждение А является ошибочным.

2. Коэффициент упругости пружины определится по её изменению длины

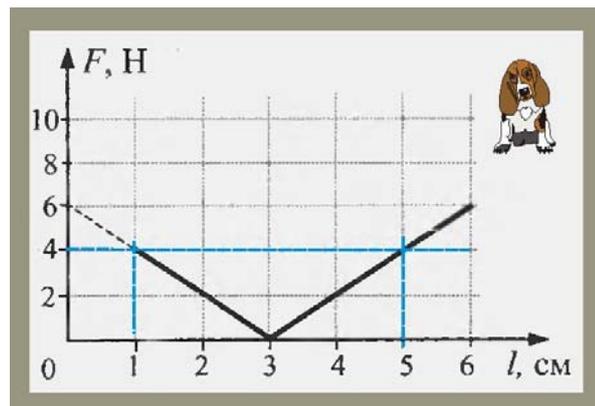


Рис. 42. Экспериментальная зависимость силы упругости

$$k = \frac{F}{\Delta \ell} = \frac{4}{2 \cdot 10^{-2}} = 200 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

Утверждение Б является справедливым.

43. Установить соответствие между техническими устройствами (приборами) и физическими явлениями, лежащими в основе их действия.

К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА	ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
А) гидравлический пресс	1) передача давления внутри жидкости
Б) поршневой жидкостный насос	2) поведение жидкости в сообщающихся сосудах
В) шлюзы	3) тепловое расширение жидкостей
	4) действие атмосферного давления



Рис. 43.1. Соответствие явлений и устройств

### Решение

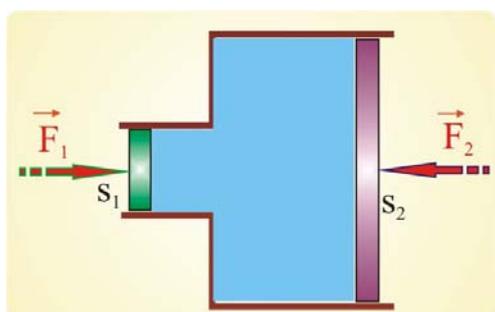


Рис. 43.2. Гидравлический пресс

1. Действие гидравлического пресса основано на законе Блеза Паскаля и соотношении между силами, действующими на поршни их площади.

2. Принцип действия гидравлического пресса так же основан на проявлении закона Паскаля(рис. 43.2). Если между двумя поршнями, большим и малым поместить жидкость и прикладывать к поршням силы, оставляя систему в равновесии, то вследствие закона Паскаля

$$F_1 s_1 = F_2 s_2, \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{s_1}{s_2},$$

т.е. действие малой силы на больший по площади поршень, способно инициировать большую силу на поршне с малой площадью.

3. Уравнение Закона Паскаля лежит в основе действия гидравлических тормозов современных автомобилей, состоящих из относительно большого по площади поршня, привод которого соединён с педалью тормоза и одного или нескольких малых поршней, прижимающих фрикционные элементы к колодкам или дискам.

4. Закон Паскаля позволил теоретически объяснить эффект, проявляющийся в сообщающихся сосудах. Рассмотрим два сосуда, заполненных жидкостями с плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  до уровней  $h_1$  и  $h_2$  (рис. 43.2). Предположим, что первоначально между сосудами расположена непроницаемая перегородка. В этом случае

$$p_1 = \rho g h_1, \quad p_2 = \rho g h_2, \quad p_2 > p_1.$$

Поскольку разные давления действуют на одно и то же общее сечение, соединяющее сосуды, то при убирании перегородки равновесие системы нару-

шится, возникнут силы, которые станут перемещать жидкость плотностью  $\rho_2$  до тех пор, пока уровни в сосудах не станут одинаковыми. Закон сообщающихся сосудов имеет следующую распространённую интерпретацию

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

5. Работа шлюзов основана на закономерностях поведения жидкости в сообщающихся сосудах.

6. Поршневой жидкостный насос основан на действии атмосферного давления, которое может перекрываться клапанами. При движении поршня вверх клапан 1 закрыт, в верхней камере создаётся давление выше атмосферного и жидкость из неё вытесняется, в то время как нижний клапан 2 открывается и там создаётся разрежение по сравнению с атмосферным давлением, жидкость туда втягивается. При движении поршня вниз процесс протекает в обратном направлении.

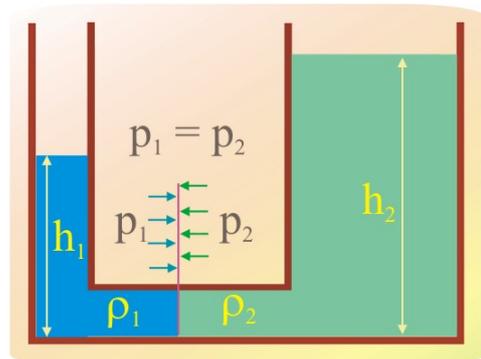


Рис. 43.3. Сообщающиеся сосуды

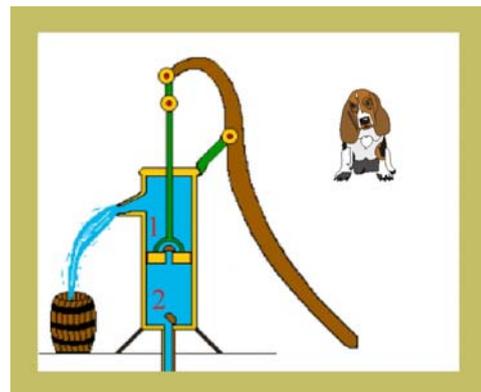


Рис. 43.4. Поршневой насос

А	Б	В
1	4	2

44. Два тела массами  $m_1 = 0,4$  кг и  $m_2 = 0,6$  кг, связанные нерастяжимой нитью, могут без трения скользить по горизонтальной поверхности под действием постоянной силы  $F$ . Чему равно отношение сил натяжения нити в случаях а и б?

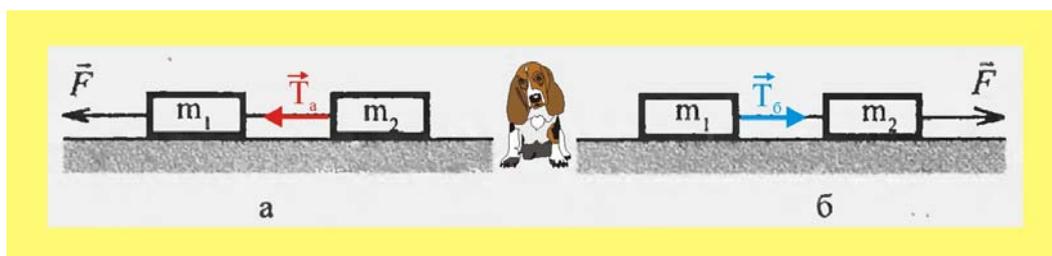


Рис. 44. Натяжение нити

### Решение

1. В соответствие со вторым законом Ньютона

$$\left. \begin{array}{l} T_a = m_2 g; \\ T_б = m_1 g; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{T_a}{T_б} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{3}{2};$$

### 3. Законы сохранения в механике

45. Тело движется прямолинейно в одном направлении. Под действием постоянной силы за время  $\tau = 3$  с импульс тела изменился на  $\Delta p = 6$  кг·м/с. Определить модуль действующей силы.

#### Решение

1. Зависимость между изменением импульса и действующей силой получим на основе второго закона Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}; \quad \vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}; \quad \vec{F}\Delta t = \Delta m\vec{v}; \quad \Rightarrow \quad |\vec{F}| = \frac{\Delta m\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\tau} = 2 \text{ Н};$$

46. Если на вагонетку массой  $m$ , движущуюся по горизонтальным рельсам со скоростью  $v$ , сверху вертикально опустить груз, масса которого  $m_2$  равна половине массы вагонетки, то, как изменится скорость вагонетки?

#### Решение

1. Вагонетку с грузом можно рассматривать как замкнутую систему, не подверженную действию внешних сил. Сила тяжести и нормальные реакции связи колёс и рельсов с направлением движения составляют угол  $90^\circ$ , поэтому работа этих сил на возможном перемещении равна нулю. Для замкнутых консервативных систем справедлив закон сохранения импульса.

2. Закон сохранения импульса в проекции на направление движения (на горизонтальную ось)

$$mv = \left(m + \frac{1}{2}m\right)u; \quad u = \frac{v}{3/2} = \frac{2}{3}v;$$

47. Мальчик массой  $m_1 = 50$  кг, стоя на гладком льду, бросает камень массой  $m_2 = 8$  кг под углом  $60^\circ$  к горизонту со скоростью  $v = 5$  м/с. Какую скорость приобретёт мальчик?

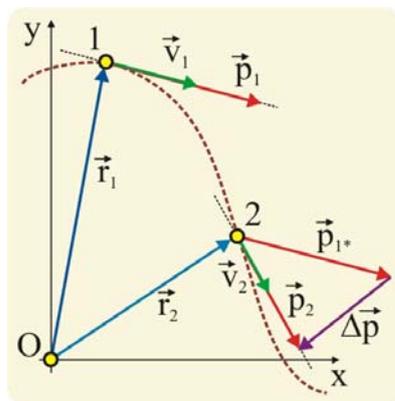


Рис. 47.1. Импульс материальной точки

#### Решение

1. Запишем ещё раз уравнение второго закона Ньютона, выразив в нём ускорение через скорость

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

2. Величина, стоящая в скобках (скалярное произведение массы точки на вектор её скорости) называется **импульсом точки** или **количеством её движения**. Естественно, что эта величина векторная и её направление совпадает с направлением вектора скорости (рис. 47.1),

т.е. импульс материальной точки всегда направлен по касательной в данной точке траектории по вектору скорости. Импульс материальной точки служит количественной векторной мерой механического движения

3. Умножим уравнение второго закона Ньютона на бесконечно малый промежуток времени  $dt$

$$\vec{F}dt = d\vec{p}, \quad d(m\vec{v}) = \vec{F}dt,$$

величина  $\vec{F}dt$  – называется **элементарным импульсом действующей силы**.

4. Последнее уравнение выражает собой математическую запись теоремы об изменении импульса: «Дифференциал импульса (количества движения) материальной точки равен элементарному импульсу, действующей на точку силы».

5. Проинтегрируем уравнение элементарного импульса силы с учётом того, что переменными величинами являются скорость и время

$$\int_{v_1}^{v_2} d(m\vec{v}) = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt.$$

6. Если сила не является функцией времени, то процесс интегрирования достаточно прост

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}(t_2 - t_1), \quad \Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.$$

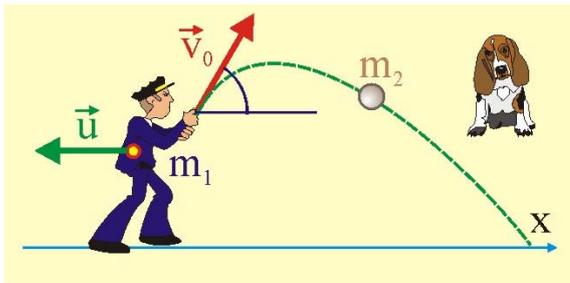


Рис. 47.2. Бросок камня

7. Закон сохранения импульса выполняется и в проекциях на оси координат. Так, например, заданный в условии задачи случай броска камня под углом к горизонту при использовании закона сохранения импульса избавляет от составления уравнений второго закона Ньютона и анализа действующих сил.

9. При использовании закона сохранения импульса непременно надо учитывать векторные свойства импульса

$$m_1 u = m_2 v_0 \cos 60^\circ; \quad \Rightarrow \quad u = \frac{m_2 v_0 \cos 60^\circ}{m_1} = 0,4 \frac{m}{c};$$

48. мяч брошен вертикально вверх. На рис. 48 показан график изменения кинетической энергии мяча по мере его подъёма над точкой бросания. Какова потенциальная энергия мяча на высоте  $h = 2$  м?

### Решение

1. В момент броска мяча его кинетическая энергия  $K_0 = 9$  Дж, а на высоте подъёма  $h = 2$  м кинетическая энергия, судя по графику, равна  $K_2 = 6$  Дж, следовательно, на основании закона сохранения механической энергии

$$K + \Pi = \text{const},$$

можно записать

$$\Pi_2 = E_0 - E_2 = 3 \text{ Дж}.$$

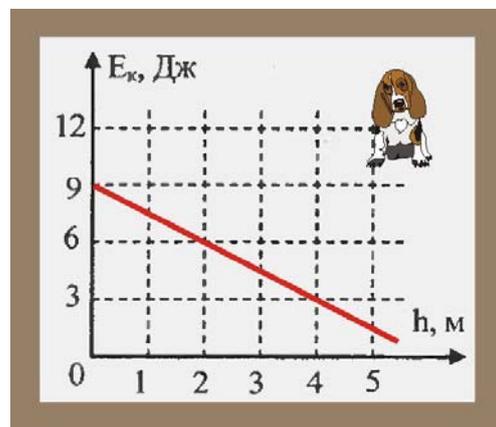


Рис. 48. Энергия мяча

49. Отношение массы грузовика к массе легкового автомобиля  $m_1/m_2 = 3$ . Каково отношение их скоростей  $v_1/v_2$ , если отношение импульсов автомобилей  $p_1/p_2 = 3$ ?

### Решение

1. Отношение импульсов автомобилей

$$\frac{p_1}{p_2} = 3 = \frac{m_1 v_1}{m_2 v_2}; \quad \frac{m_1}{m_2} = 3; \quad \Rightarrow \quad v_1 = v_2; \quad \frac{v_1}{v_2} = 1;$$

50. Легковой автомобиль и грузовик движутся со скоростями  $v_1 = 108$  км/ч и  $v_2 = 54$  км/ч. Масса легкового автомобиля равна  $m_1 = 1000$  кг. Какова масса грузовика, если отношение импульса грузовика к импульсу автомобиля равно  $p_2/p_1 = 1,5$ ?

### Решение

1. Переведём скорости из км/ч в м/с:  $v_1 = 30$  м/с;  $v_2 = 15$  м/с.

2. Найдём отношение импульсов транспортных средств

$$\frac{p_2}{p_1} = 1,5 = \frac{m_2 v_2}{m_1 v_1}; \quad 1,5 m_1 v_1 = m_2 v_2; \quad m_2 = \frac{1,5 m_1 v_1}{v_2} = \frac{1,5 \cdot 10^3 \cdot 30}{15} = 3 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

51. После удара клюшкой шайба стала скользить по ледяной горке, у её вершины шайба имела скорость  $v_2 = 5$  м/с. Высота горки  $h = 10$  м. Пренебрегая трением шайбы о лёд, определить начальную скорость шайбы.

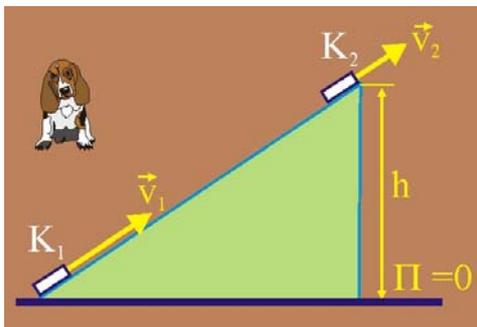


Рис. 51. Энергия шайбы на горке

### Решение

1. Если за нулевой уровень потенциальной энергии принять основание горки, то на вершине сумма кинетической и потенциальной энергии шайбы должна, в соответствии с законом сохранения механической энергии, быть равна кинетической энергии шайбы в момент броска у подножия

$$K_1 = K_2 + \Pi_2; \quad \frac{m v_1^2}{2} = \frac{m v_2^2}{2} + mgh; \quad v_1^2 = v_2^2 + 2gh;$$

$$v_1 = \sqrt{v_2^2 + 2gh} = \sqrt{25 + 200} = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

52. Охотник массой  $m_1 = 60$  кг, стоящий на гладком льду, стреляет из ружья дробью в горизонтальном направлении. Масса заряда равна  $m_2 = 0,03$  кг. Скорость дробинок одинакова, и равна  $v_2 = 300$  м/с. Какую скорость приобретёт охотник после выстрела?

### Решение

1. Дробинки летят в одном направлении, поэтому их импульсы суммируются. Закон сохранения импульса на направление движения дробинок представится в виде

$$m_1 v_1 = m_2 v_2; \quad v_1 = \frac{m_2 v_2}{m_1} = \frac{0,03 \cdot 300}{60} = 0,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

53. По гладкой горизонтальной плоскости по осям  $x$  и  $y$  движутся две шайбы массами с импульсами  $p_1 = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$  и  $p_2 = 3,5 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$ , как показано на рис. 53. После соударения вторая шайба продолжает двигаться по оси  $y$  в прежнем направлении с импульсом, равным по модулю  $p_3 = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$ . Определить модуль импульса первой шайбы после удара.

### Решение

1. Закон сохранения импульса позволяет найти модуль импульса первой шайбы после упругого столкновения

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4;$$

$$|\vec{p}_1 + \vec{p}_2| = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \cong 4 \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}};$$

$$|\vec{p}_3 + \vec{p}_4| = 4 = \sqrt{p_3^2 + p_4^2};$$

$$16 = 4 + p_4^2; \quad p_4 = \sqrt{12} \cong 3,5 \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}},$$

чтобы вектор импульса после удара сохранился, первая шайба должна двигаться в прежнем направлении. Шайбы, обменявшись импульсами, продолжают движение в прежнем направлении.

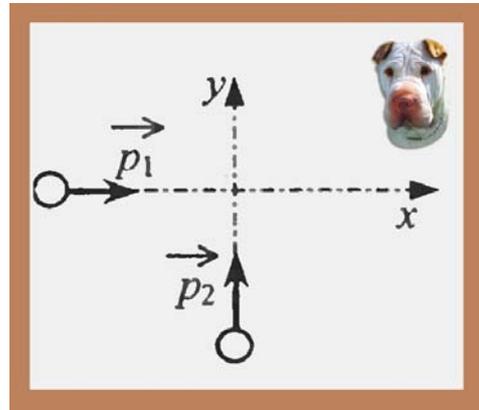


Рис. 53. Упругое столкновение

54. Шайба съезжает с горки высотой  $H$  без трения из состояния покоя. Ускорение свободного падения равно  $g$ . У подножия горки кинетическая энергия шайбы равна  $E_k$ . Чему равны масса шайбы и модуль её импульса у подножия горки?

Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ФОРМУЛА
А) масса шайбы	1) $E_k \sqrt{\frac{2}{gH}}$
Б) модуль импульса шайбы у подножия горки	2) $\frac{\sqrt{2E_k}}{gH}$
	3) $\sqrt{\frac{2E_k}{gH}}$
	4) $\frac{E_k}{gH}$

Рис. 54. Соответствие физических величин и уравнений

### Решение

1. Из закона сохранения механической энергии (потенциальная энергия в начале спуска равна кинетической энергии в конце спуска) имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = mgH; \quad \Rightarrow \quad m = \frac{E_k}{gH};$$

2. С другой стороны, скорость шайбы в конце спуска

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

тогда модуль импульса шайбы

$$|\vec{p}| = mv = \frac{E_k}{gH} \sqrt{2gH}; \Rightarrow |\vec{p}| = E_k \sqrt{\frac{2}{gH}};$$

А	Б
4	1

55. Приведена экспериментальная зависимость модуля упругости пружины F от её растяжения Δx:

F, Н	0	0,5	1,0	1,50	2,0	2,5
Δx, м	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1

Определить потенциальную энергию пружины при её растяжении на Δx = 0,08 м.

### Решение

1. Сила упругости пружины подчиняется закону Гука

$$F = k\Delta x; \Rightarrow k = \frac{F}{\Delta x} = 25 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

2. Потенциальная энергия, накапливаемая в пружине при её деформации численно равна работе, затраченной на создание этой деформации

$$\delta A = F dx = kx dx; \quad A = \Pi = k \int_{x_1}^{x_2} x dx = \frac{k\Delta x^2}{2} = \frac{25 \cdot 0,064}{2} = 0,08 \text{ Дж};$$

56. При деформации стальной пружины на Δx = 1 см в ней запасается потенциальная энергия Π<sub>1</sub> = 1 Дж. На сколько изменится потенциальная энергия этой пружины, если её деформацию увеличить ещё на Δx = 1 см?

### Решение

1. Поскольку потенциальная энергия пружины пропорциональна деформации Δx<sup>2</sup>, то разность энергий составит:

$$\Delta \Pi = \Pi_2 - \Pi_1 = k \frac{(2\Delta x)^2}{2} - k \frac{\Delta x^2}{2} = 3k \frac{\Delta x^2}{2};$$

2. Потенциальная энергия при первоначальном растяжении задана

$$\Pi_1 = \frac{k\Delta x^2}{2} = \text{Дж}; \Rightarrow \Delta \Pi = 3 \text{ Дж};$$

57. Груз пружинного маятника совершает горизонтальные гармонические колебания между точками 1 и 3. Как меняется кинетическая энергия груза, скорость груза и жёсткость пружины от точки 2 к точке 1?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

1) увеличивается; 2) уменьшается; 3) не изменяется.

Запишите в таблицу цифры для каждой физической величины. Цифры могут повторяться.

## Решение

1. Полная энергия колеблющейся массы должна оставаться постоянной, т.е. справедлив закон сохранения энергии. В процессе колебаний происходит преобразование потенциальной энергии в кинетическую энергию. В крайних положениях (точки 1 и 3) масса обладает только потенциальной энергией, которая имеет максимальное значение. В средних положениях массы (точка 2) энергия имеет кинетический характер

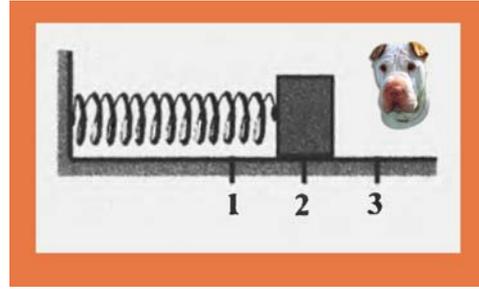


Рис. 57.1. Горизонтальные колебания

$$E_2 = \Pi_{\max} = \frac{kx_0^2}{2}, \quad E_{1,3} = K_{\max} = \frac{m\dot{x}_0^2}{2} = \frac{mx_0^2\omega^2}{2}.$$

2. Выясним закон изменения кинетической и потенциальной энергии в случае гармонического колебания

$$K(t) = \frac{m\dot{x}^2}{2} = \frac{mx_0^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0),$$

$$\Pi(t) = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_0^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0),$$

3. Заменяя в уравнении  $k$  на  $m\omega^2$ , и складывая уравнения, получим

$$E = K + \Pi = \frac{kx_0^2}{2} = \frac{mx_0^2\omega^2}{2}, \quad \langle E \rangle = \frac{E}{2}.$$

4. Периодичность изменения энергии установим, переписав уравнения в соответствии с тригонометрическими правилами

$$K(t) = K_{\max} \sin^2(\omega t + \varphi_0) = K_{\max} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2(\omega t + \varphi_0) \right],$$

$$\Pi(t) = \Pi_{\max} \cos^2(\omega t + \varphi_0) = \Pi_{\max} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\omega t + \varphi_0) \right],$$

очевидно, что кинетическая и потенциальная энергии изменяются с частотой  $2\omega$ , в два раза превышающей частоту колебаний. В моменты амплитудного значения смещения кинетическая энергия обращается в нуль, а полная энергия колебаний равна наибольшему значению потенциальной энергии (рис. 57.2)

$$E = \Pi_{\max} = \frac{kA^2}{2}.$$

5. При прохождении системой положения равновесия при  $x = 0$ , полная энергия является кинетической

$$E = K_{\max} = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

6. Разумеется, что в отсутствие сопротивления значение максимальной кинетической энергии совпадает со значением максимальной потенциальной энергии колебательной системы.

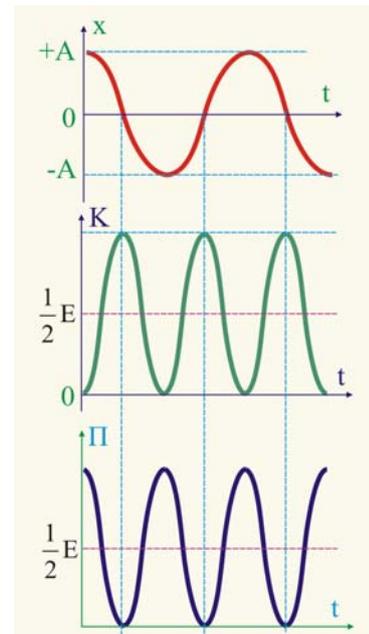


Рис. 57.2. Зависимость смещения и энергии от времени

7. Средние значения кинетической энергии  $\langle K \rangle$  и потенциальной  $\langle \Pi \rangle$  равны половине полной энергии

$$\langle K \rangle = \langle \Pi \rangle = \frac{E}{2} = \frac{kA^2}{4}.$$

8. Таким образом, при движении массы от точки 2 к точке 1 кинетическая энергия уменьшается, скорость груза уменьшается, а жёсткость пружины остаётся неизменной.

Кинетическая энергия груза маятника	Скорость груза	Жёсткость пружины
2	2	3

58. Для сообщения неподвижному телу заданной скорости  $v$  требуется совершить работу  $A_1$ . Какую работу  $A_2$  надо совершить для увеличения скорости от значения  $v$  до значения  $2v$ ?

### Решение

1. Запишем второй закон Ньютона, представив ускорения в виде производной скорости по времени

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

2. Умножим обе части уравнения на бесконечно малое перемещение  $d\vec{r}$

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

3. Проинтегрируем в соответствующих пределах изменения переменных величин:

$$\int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{r} = m \int_{v_1}^{v_2} \vec{v} d\vec{v}; \quad A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

это уравнение теоремы об изменении кинетической энергии: работа, произведенная силами на заданном перемещении равна изменению потенциальной энергии на этом же перемещении

4. Воспользуемся уравнением теоремы

$$A_2 = \frac{4mv^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = \frac{3mv^2}{2} = 3A_1;$$

59. Камень брошен с поверхности земли под углом к горизонту в отсутствии сопротивления. Как меняются с набором высоты: модуль ускорения камня, его потенциальная энергия в поле тяжести и горизонтальная составляющая скорости?

Для каждой величины определите характер изменения:

1) увеличивается, 2) уменьшается, 3) не изменяется.

Цифры, которые могут повторяться, занести в таблицу.

### Решение

1. Тело, брошенное в поле земного тяготения с начальной скоростью  $v_0$ , направленной под углом  $\alpha$  к горизонту будет двигаться по криволинейной траектории, лежащей в плоскости, перпендикулярной поверхности земли. Существенно отметить, движение протекает при постоянном по модулю и направлению ускорении  $\vec{g}$ . Это даёт возможность разложить криволинейное движение

на два более простых: равномерное вдоль горизонтальной оси т.к.  $g_x = 0$  и ускоренное по вертикальной оси, где проявляется двойка ускорение свободного падения (рис. 59).

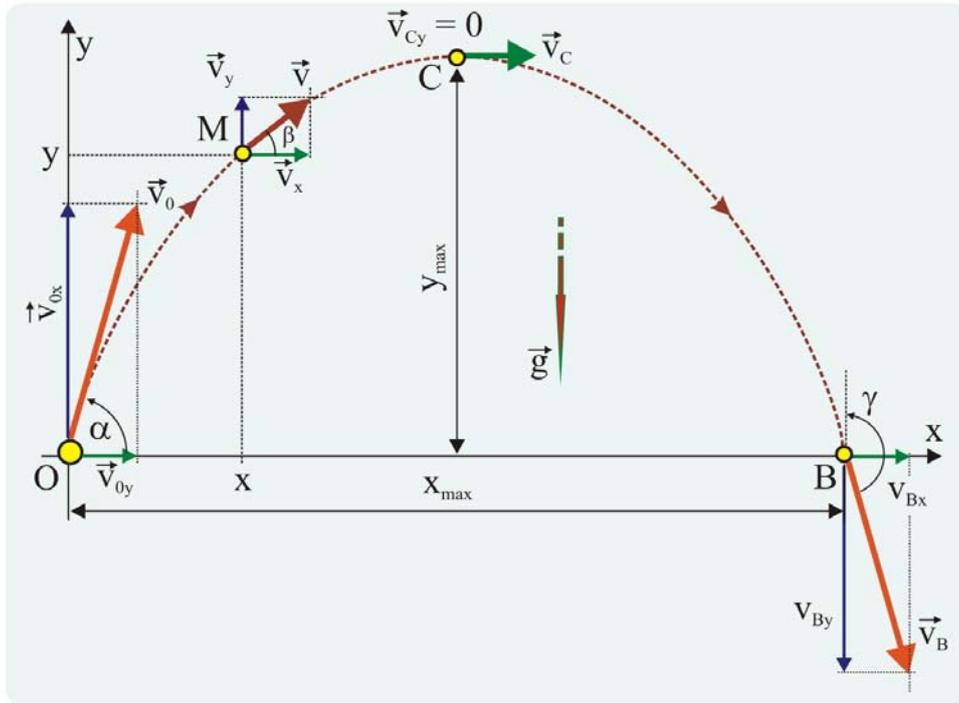


Рис. 59. Тело, брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту

2. Движение исследуемого тела относительно вертикальной оси из начальной точки  $O$  в точку  $C$  – равнозамедленное, а из точки  $C$  в точку  $B$  – равноускоренное с ускорением свободного падения  $\vec{g}$ . В начальный момент времени при  $t = 0$  имеем:  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$ ,  $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$ ,  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ .

3. Для проекций скорости в любой момент времени, например в точке  $M$ , движения можно записать следующие уравнения

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cos \alpha, \\ v_y(t) = v_0 \sin \alpha - gt. \end{cases}$$

4. Модуль вектора скорости определится как

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0 \sin \alpha - gt)^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + (v_0^2 \sin^2 \alpha - 2v_0 \sin \alpha gt + g^2 t^2)},$$

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_0^2 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) - 2v_0 gt \sin \alpha + g^2 t^2}.$$

5. Положение вектора скорости определим, используя свойства прямоугольного треугольника, построенного на векторе скорости и его проекциях

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{|\vec{v}_y|}{|\vec{v}_x|}, \quad \Rightarrow \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

6. Уравнения движения запишем, используя особенности равномерного перемещения точки по горизонтали и равноускоренного по вертикали

$$\begin{cases} x(t) = v_0 t \cos \alpha, \\ y(t) = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \end{cases}$$

7. Время подъёма тела в верхнюю точку траектории С определим, используя второе уравнение системы при условии:  $v_y = 0$

$$v_0 \sin \alpha - gt_c = 0, \Rightarrow t_c = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

8. Определим далее полное время полёта

$$\tau = 2t_c = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

9. При подстановке времени полёта  $\tau$  в первое уравнение системы получим максимальную дальность броска

$$x_{\max} = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

10. Из последнего уравнения, в частности, следует, что при прочих равных условиях максимальная дальность броска будет иметь место при  $\alpha = 45^\circ$ , т.к. в этом случае  $2\alpha = \pi/2$ ,  $\sin 2\alpha = 1$ .

11. Максимальная высота подъёма определится как:

$$y_{\max} = v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g^2},$$

$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

12. В точке траектории С потенциальная энергия будет максимальной, если за нулевой уровень принять поверхность земли. Другими словами, потенциальная энергия по мере движения камня из точки О в точку С возрастает до максимальной величины

$$P_{\max} = vgy_{\max},$$

а затем уменьшается в точке В до нуля.

13. Ускорение камня как по модулю, так и по направлению не меняется в течении полёта, оставаясь всё время равной  $\vec{g}$ .

14. Горизонтальная составляющая скорости  $v_x$  остаётся постоянной т.к. движение по этой оси равномерное  $g_x = 0$ .

Модуль ускорения камня	Потенциальная энергия камня	Горизонтальная составляющая камня
3	1	3

60. Пластиновый шар налетает на неподвижную тележку, соединённую с невесомой пружиной и прилипает к ней. Что происходит с величинами, характеризующими материальную систему «шар + тележка» в ходе процесса соударения: механической энергией системы, импульсом системы и Полной энергией системы.

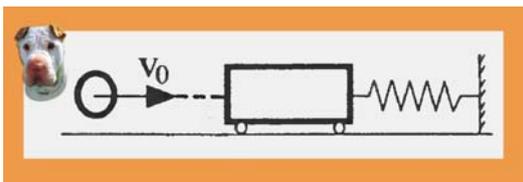


Рис. 60. Неупругое столкновение

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения

- 1) увеличилась;
- 2) уменьшилась;
- 3) не изменилась.

### Решение

1. До столкновения система «шар + тележка» обладает только кинетической энергией шара. После столкновения кинетическая энергия шара, который при-

лип, распределяется между массой шара и тележки и система движется вправо, трансформируясь в потенциальную энергию пружины.

2. Для системы тел, так же как и для изолированного тела справедливы законы сохранения энергии и импульса, поэтому полная механическая энергия системы и её импульс остаются постоянными.

Механическая энергия системы тел	Импульс системы тел	Полная энергия системы тел
1	3	3

61. Пластилиновый шар (рис.60) налетает на тележку. Охарактеризовать, что происходит с различными видами энергии системы при смещении шара из крайне левого в крайне правое положение.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕНЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ
А) кинетическая энергия шара	1) уменьшается
Б) кинетическая энергия тележки	2) увеличивается
В) потенциальная энергия пружины	3) сначала увеличивается, затем уменьшается

Рис. 61. Изменение видов энергии в процессе неупругого соударения

### Решение

1. При налипании шара на тележку его первоначальная кинетическая энергия частично передаётся тележке, поэтому – уменьшается.

2. Кинетическая энергия тележки до удара была равна нулю, а затем выросла до некоторой величины, т.е. увеличилась, потом по мере сжатия пружины, она переходит в потенциальную энергию пружины.

3. Потенциальная энергия пружины увеличивается т.к. она сжимается при совместном движении тележки совместно с налипшим шаром

А	Б	В
1	3	2

62. Две тележки движутся навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями  $v$ . Массы тележек  $m$  и  $2m$ . Какой будет скорость движения после абсолютно неупругого их столкновения?

### Решение

1. Запишем закон сохранения импульса в проекции на горизонтальную ось, направление которой совпадает с направлением движения тележки с большей массой

$$2mv - mv = (m + 2m)u; \Rightarrow u = \frac{mv}{3m} = \frac{v}{3};$$

#### 4. Механические колебания и волны

63. Скорость тела, совершающего гармонические колебания, меняется с течением времени по закону:  $v = 3 \cdot 10^{-2} \sin 2\pi t$ , где все величины выражены в СИ. Чему равно амплитудное значение скорости?

#### Решение

1. Уравнение скорости гармонического процесса в общем виде

$$v(t) = v_{\max} \sin \omega t; \Rightarrow v_{\max} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

64. Шарик, подвешенный на невесомом стержне, отклоняют вправо. Через какую долю периода кинетическая энергия шара будет максимальной?

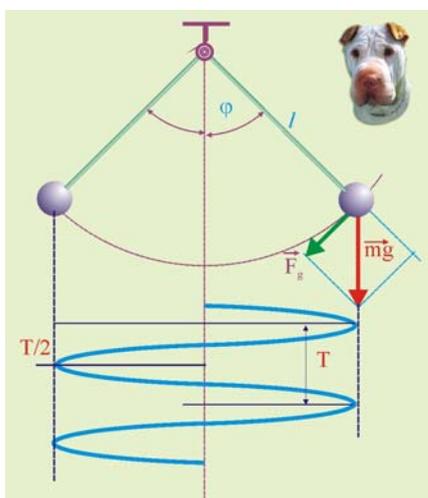


Рис. 64. Качание шарика

#### Решение

1. Если за нулевой уровень потенциальной энергии принять положение статического равновесия, то в крайних положениях (если отсутствует сопротивление, то безразлично в каком) шарик будет обладать максимальной потенциальной энергией

$$\Pi_{\max} = mgh = mg\ell(1 - \cos\varphi).$$

2. В положении статического равновесия (вертикальное положение стержня) вся потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию, это произойдет через четверть периода (рис. 64).

65. Исследуются колебания пружинного маятника при различных значениях массы маятника. Если увеличивать массу груза, то как изменяются: период колебаний, частота колебаний, период изменения потенциальной энергии? Для каждой величины определить соответствующий характер:

- 1) увеличивается, 2) уменьшается, 3) не изменяется.

#### Решение

1. Частота и период собственных колебаний пружинного маятника

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad 2\pi\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = \frac{1}{\nu} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

2. Период колебаний с увеличением массы растёт, частота колебаний уменьшается, потенциальная энергия изменяется с двойной частотой (рис. 57.2) и тоже увеличивается.

Период колебаний	Частота колебаний	Период изменения потенциальной энергии
1	2	2

66. Пружинный маятник в отсутствие сопротивления совершает свободные незатухающие гармонические колебания. Пружину меняют на более жёсткую, оставляя амплитуду колебаний  $A$  прежней. Как изменятся при этом три величины: период колебаний, максимальная потенциальная энергия, максимальная кинетическая энергия?

1) увеличится, 2) уменьшится, 3) не изменится.

### Решение

1. Период колебаний уменьшится, потому что:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}};$$

2. Максимальная потенциальная энергия тоже увеличится

$$\Pi_{\max} = \frac{kA^2}{2};$$

3. Максимальные значения кинетической и потенциальной энергии при незатухающих гармонических колебаниях численно равны, поэтому увеличение амплитудного значения потенциальной энергии сопровождается ростом максимального значения кинетической энергии.

Период колебаний	Максимальная потенциальная энергия маятника	Максимальная кинетическая энергия маятника
2	1	1

67. Шарик, подвешенному на нерастяжимой невесомой нити, находящемуся в положении равновесия сообщили горизонтальную скорость  $v_0$ . На какую максимальную высоту поднимется шарик?

### Решение

1. Шарик будет подниматься до того момента, пока начальная его кинетическая энергия не трансформируется в потенциальную энергию. На основании закона сохранения механической энергии:

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh; \Rightarrow h = \frac{v_0^2}{2g};$$

68. Подвешенный на пружине груз совершает вынужденные гармонические колебания под действием силы, меняющейся с частотой  $\nu$ . Установить соответствие между физическими величинами этого процесса и частотой их изменения.

ВЕЛИЧИНЫ		ЧАСТОТА ИЗМЕНЕНИЯ
А) кинетическая энергия		1) $\frac{1}{2}\nu$
Б) скорость		2) $\nu$
В) потенциальная энергия		3) $2\nu$

Рис. 68. Соответствие физических величин и уравнений

### Решение

1. После затухания собственных колебаний все кинематические и динамические параметры колебательной системы ( кроме энергии) будут изменяться с частотой вынуждающей силы. Энергия (как потенциальная, так и кинетическая) изменяются с двойной частотой вынуждающей силы (рис. 57.2)

А	Б	В
3	2	3

69. Приведена зависимость смещения массы математического маятника от времени. Оценить, примерно, максимальную скорость массы в этом гармоническом колебательном процессе.

t, с	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
x, см	6	3	0	3	6	3	0	3

### Решение

1. По таблице определим период колебательного процесса и амплитуду

$$T = 0,4 \text{ с}, \quad A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

2. Так как в нулевой момент времени смещение максимально, то маятник колеблется по закону косинуса

$$x(t) = A \cos \omega t = A \cos \frac{2\pi}{T} t;$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} = A\omega \sin \omega t; \quad \Rightarrow \quad v_{x(\max)} = A \frac{2\pi}{T} = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 6,28}{0,4} = 0,471 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

70. При изучении свободных колебаний пружинного маятника изменяют его массу. Как изменятся при увеличении массы: период колебаний, частота колебаний и период изменения потенциальной энергии? Для каждой величины определить соответствующий характер изменения:

1) увеличится, 2) уменьшится, 3 не изменится.

### Решение

1. Период колебаний маятника с ростом колеблющейся массы увеличится, потому что:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}};$$

2. Частота колебаний массы уменьшится, потому что период колебаний есть величина обратная частоте

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}};$$

3. Период изменения потенциальной энергии равен половине периода изменения смещения и скорости, поэтому с увеличением массы период изменения потенциальной энергии будет увеличиваться.

А	Б	В
1	2	1

71. Груз, подвешенный на лёгком стержне, движется между точками 1 и 3. В каком положении равнодействующая сила, действующая на груз максимальна?

**Решение**

1. Груз движется по криволинейной траектории, значит ускоренно. Максимальное значение нормального (центростремительного) ускорения будет иметь место в точке 2, где скорость максимальна

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

2. В точке 2 сила тяжести будет складываться с силой инерции, вызванной наличием нормального ускорения

$$F_2 = mg + ma_n = m(g + a_n).$$

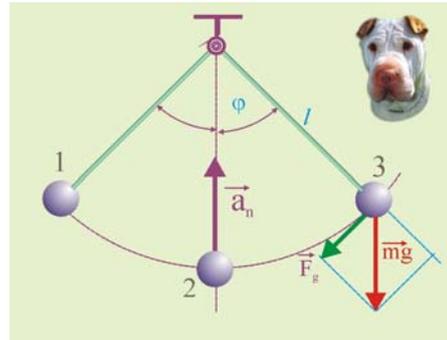


Рис. 71. Сила растяжения стержня

72. В первой серии опытов исследовались малые колебания груза на нити некоторой длины. Затем тот же груз закрепили на более длинной нити, оставив без изменения максимальный угол отклонения. Как при этом изменятся: период колебаний, частота и амплитуда колебаний:

- 1) увеличится, 2) уменьшится, 3) не изменится.

**Решение**

1. Изохронность колебаний математического маятника была установлена Галилео Галилеем, он же впервые записал уравнение периода математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}},$$

увеличение длины нити подвеса приведёт к увеличению периода колебаний.

2. Частота колебаний, наоборот, уменьшится, потому что

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\ell}};$$

3. Амплитуда колебаний увеличится, т.к. при фиксированном значении угла, длина катетов тем больше чем длиннее гипотенуза.

А	Б	В
1	2	1

## 5. Молекулярная физика. Термодинамика

73. Под микроскопом наблюдают хаотическое движение мельчайших частиц мела в капле растительного масла. Это явление называют:

- 1) конвекцией жидкости,
- 2) диффузией жидкости,
- 3, испарением жидкости,
- 4) броуновским движением.

### Решение

1. Под микроскопом наблюдают броуновское движение.

2. Наблюдать воочию модель теплового движения молекул посчастливилось не физику, не химику, а ботанику, Роберту Броуну (1773 – 1858), хранителю научной библиотеки Королевской академии. Возвратившись из очередной географической экспедиции, Броун в тиши лондонского кабинета в 1827 г. изучал посредством микроскопа добытые экземпляры растений.

3. Очередь дошла до цветочной пыльцы, представляющей собой, по сути, мелкодисперсные крупинки. Капнув на покрывное стеклышко капельку воды, Броун внёс туда некоторое количество цветочной пыльцы. Посмотрев в микроскоп, Броун обнаружил, что в фокальной плоскости микроскопа происходит непонятное (рис. 73).

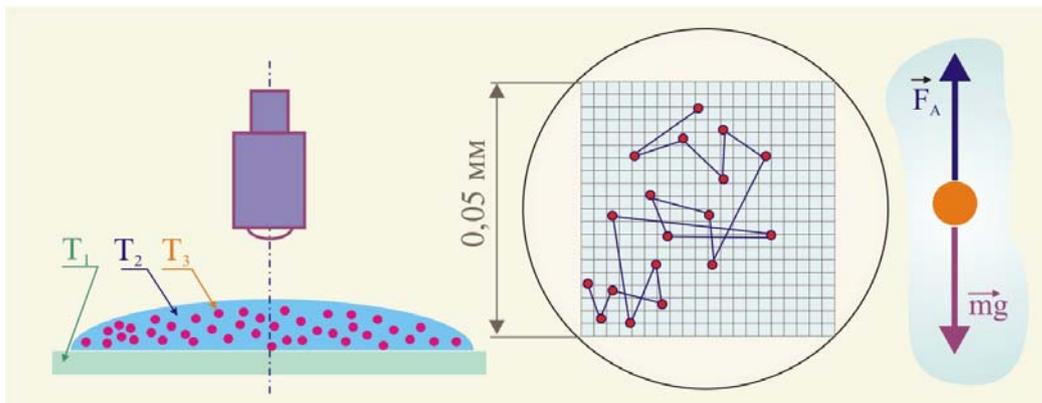


Рис. 73. Наблюдения Роберта Броуна

4. Частицы пыльцы постоянно перемещались хаотичным образом, не позволяя исследователю их рассмотреть. Первое, что пришло в голову ботанику – конвективные потоки. Разные температуры стекла  $T_1$ , воды в капле  $T_2$  и самих частичек  $T_3$  вполне могли вызвать конвекционные тепловые потоки, которые и увлекали объекты наблюдения. Выждав время, когда температуры должны были сравняться, Броун снова устремил свой пытливый взор в микроскоп. Ничего не изменилось. Пыльца продолжала сновать.

5. Пришла новая идея. На этот раз под подозрение попали английские кэбы, повозки для перевозки грузов и пассажиров, снабжённые деревянными колёсами с железными ободьями. Как предположил Броун, катясь по брусчатке мостовой, колёса экипажей содрогали землю и здания. Было решено эксперимент перенести в загородный дом, где нет кэбов, брусчатки и вообще, там спокойнее, чем в Лондоне. Но и эта уловка не принесла желаемых результатов. Не-

объяснимая суэта частиц продолжалась. Исчерпав свои возможности усмирить непокорные пылинки, Броун решил поведать о своих наблюдениях коллегам. Опубликованная Броуном статья имела типичное для того неторопливого времени название: «Краткий отчёт о микроскопических наблюдениях, проведенных над частицами в июне и августе 1827 г., содержащимися в пыли растений; и о существовании активных молекул в органических и неорганических телах».

6. По началу статья Броуна вызвала у специалистов недоумение, отчасти, наверное, ввиду необычности наблюдаемого явления, отчасти вследствие пространных разглагольствований автора о «живой силе», присущей органическим веществам. Вместе с тем, спустя некоторое время, факт нестандартного поведения частиц заинтересовал физиков.

7. Голландец Корнабель в 1880 г. и француз Гуи в 1888 г. повели более тщательные наблюдения, из которых стало ясно, что степень подвижности частиц определяется их массой и температурой. Первоначально предположили, что наблюдаемые частицы движутся от ударов, получаемых от молекул окружающей их жидкости. При несоизмеримо больших размерах частицы получают одновременно множество ударов со всех сторон, поэтому результирующий импульс должен быть равным или близким к нулю. В этой связи заметного движения крупных частиц не наблюдается.

8. Если рассматривать частицы мелкие, как это случилось в опытах Броуна, то количество единичных импульсов, получаемых частицей с разных направлений, будет уже не одинаковым. Во-первых, число соударений станет несимметричным, во-вторых скорости с которыми будут подлетать молекулы жидкости к частице тоже будут неодинаковыми, поскольку они являются результатом обмена импульсами с соседними молекулами жидкости. Такая возможная двойная асимметрия сообщает частице некий результирующий импульс, под действием которого она получает некоторое перемещение  $r$ , которое будет продолжаться, пока новый результирующий импульс не изменит направление её перемещения.

9. Исследователи влияние внутренних течений жидкости отбросили сразу, потому что в области течения частички должны перемещаться в одном или близком направлении, на опыте такого не наблюдалось. Соседние частицы двигались совершенно независимо.

10. Ботанику, можно сказать, повезло. Броун совершенно случайно в качестве объектов исследования выбрал частицы, на которые в воде действовали две силы: сила тяжести и сила Архимеда, причём модули этих сил были практически одинаковы. Частицы находились в воде в состоянии безразличного равновесия. Физики совершенно справедливо предположили, что броуновское движение, так оно было названо в честь человека, впервые его наблюдавшего. Причиной такого движения являются беспорядочные столкновения частиц, в результате которых они обмениваются своими импульсами и энергиями, хаотически меняя направления своих перемещений, так что средняя величина перемещения

$$\langle r \rangle = 0.$$

11. Если перемещение броуновских частиц охарактеризовать величиной  $\langle r^2 \rangle$ , то она уже не будет эквивалентна нулю и для неё можно записать следующее уравнение движения

$$m \frac{d^2 \langle r^2 \rangle}{dt^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{d \langle r^2 \rangle}{dt} - 2m \left\langle \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 \right\rangle = 0,$$

где  $m$  – масса частицы,  $\zeta$  – коэффициент подвижности частицы, связывающий её скорость  $v$  с силой сопротивления  $F_\mu$

$$v = \frac{dr}{dt} = \zeta F_\mu.$$

12. Сила сопротивления сферических частиц в жидкости радиусом  $R$  определяется законом Стокса

$$\zeta = \frac{1}{6\pi\eta R},$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости. Первое слагаемое в уравнении движения частицы представляет собой удвоенное значение кинетической энергии частицы

$$2K_0 = m \frac{d \langle r^2 \rangle}{dt^2} = m \langle v^2 \rangle.$$

13. Кинетическую энергию частицы можно выразить через термодинамические параметры, абсолютную температуру  $T$  и постоянную Больцмана  $k_B$

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{i}{2} k_B T,$$

где  $i = 3$  – число степеней свободы частицы. Решение уравнения движения частицы с учётом полученных соотношений имеет вид

$$\frac{d}{dt} \langle r^2 \rangle = 2k_B T \zeta \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{mB}\right) \right\}.$$

14. Величина  $\exp(-t/mB)$  в нормальных условиях пренебрежимо мала, с учётом того, что при наблюдениях за броуновскими частицами  $t \gg 10^{-5}$  с. В этом случае уравнение, характеризующее квадрат среднего перемещения, перепишется следующим образом

$$\Delta \langle r^2 \rangle = 2k_B T \zeta \Delta t.$$

15. Таким образом, квадрат перемещения частицы вдоль произвольной оси пропорционален температуре среды и промежутку времени, в течение которого перемещение происходит. Вернувшись снова к наблюдениям Броуна и его последователей, учёные поняли, что ботаник обнаружил прекрасную физическую модель поведения молекул газа, которые, будучи предоставленные самим себе поведут подобным образом. Далее эта модель усложнялась и уточнялась, оставаясь основательным доказательным фактом теплового хаотического движения структурных элементов вещества.

74. Явление диффузии в жидкостях свидетельствует о том, что молекулы жидкостей:

- 1) движутся хаотично,
- 2) притягиваются друг к другу,
- 3) состоят из атомов,
- 4) колеблются около положения равновесия.

### Решение

1. Предположим, что в объёме некоторой жидкости имеется вертикальный градиент концентрации молекул другой жидкости. Будем рассматривать концентрацию, как функцию вертикальной координаты  $n(z)$ . Если перпендикулярно оси  $z$  расположить площадку площадью  $s$ , то через неё будет наблюдаться поток частиц, обусловленный выравниванием концентрации в наблюдаемом

объёме. Экспериментально установлено, что в единицу времени через площадку проходит количество частиц

$$\Phi = -D \frac{\Delta n}{\Delta z} s,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, величина которого определяется физическими свойствами рассматриваемой системы. Поток частиц в единицу времени имеет размерность  $[\Phi] = \text{с}^{-1}$ , поэтому коэффициент диффузии измеряется в

$$[D] = \frac{\Phi}{\frac{\Delta n}{\Delta z} s} = \frac{\text{с}^{-1} \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

2. Знак минус в уравнении диффузии означает, что поток частиц направлен от больших концентраций частиц в сторону меньших концентраций. Умножим далее уравнение на массу частиц, принимающих участие в процессе диффузии, получим

$$\Phi m = -D \frac{\Delta n}{\Delta z} m s, \Rightarrow M = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta z} s,$$

т.к. плотность газа  $\rho = mn$ . Уравнение выражает собой первый закон Фика, который предполагает определение коэффициента диффузии  $D$  для каждого вещества экспериментальным путём. Другими словами, первый закон Фика является эмпирическим законом, применимым не только для газообразных систем.

3. В этой связи следует оговориться, что в жидкостях и твёрдых телах потоки частиц в каких-либо направлениях могут быть вызваны не только молекулярными причинами. Например, конвекционное движение частиц, вызванное внешними причинами, ничего общего с молекулярной диффузией не имеет.

4. Коэффициент диффузии определяется уравнением

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \ell \rangle,$$

где  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$  – средняя арифметическая скорость молекул в их тепловом

хаотическом движении,  $\langle \ell \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$  – средняя длина свободного пробега молекул от столкновения до столкновения,  $d$  – диаметр молекулы,  $n$  – концентрация.

7. Из приведенных уравнений видно, что процесс диффузии веществ обусловлен их хаотическим тепловым движением.

75. Объём сосуда с идеальным газом уменьшили вдвое, выпустив при этом половину газа, оставив температуру прежней. Как изменятся: давление газа в сосуде, его плотность и внутренняя энергия?

Для каждой величины определить соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается,
- 2) уменьшается,
- 3) не изменяется.

### Решение

1. Давление газа

$$p = nk_B T,$$

где  $n = N/V$  – концентрация молекул, она не изменилась т.к. наполовину уменьшился объём, и наполовину же уменьшилось число молекул.

2. Плотность газа

$$pV = \frac{m}{\mu} RT; \quad p = \frac{m}{V} \frac{RT}{\mu} = \rho \frac{RT}{\mu}; \quad \rho = \frac{p\mu}{RT},$$

если давление не изменяется, то при постоянстве температуры плотность тоже не меняется.

3. Внутренняя энергия газа

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT,$$

уменьшится вдвое, т.к. масса уменьшается наполовину.

Давление	Плотность	Внутренняя энергия
3	3	2

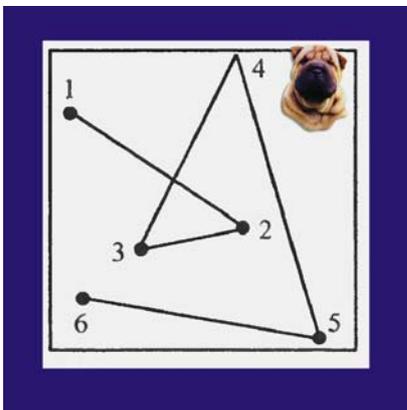


Рис. 76.1. Броуновское движение

76. На схеме показаны положения частицы при броуновском движении в жидкости с интервалом  $\tau = 60$  с. О движении частицы из положения 1 в положение 2 можно сказать, что:

- 1) Частица двигалась из положения 1 в положение 2 равномерно и прямолинейно;
- 2) Частица из положения 1 в положение 2 двигалась равноускоренно;
- 3) Частица совершала гармонические колебания;
- 4) Частица двигалась по ломаной линии с концами в точках 1 и 2.

### Решение

1. Скорости частиц в их хаотическом тепловом броуновском движении составляют десятки, а то и сотни метров в секунду, что говорит о том, что в течение времени  $\tau$  частица обязательно должна сталкиваться с соседними частицами (молекулами жидкости) и менять своё направление, частота столкновений примерно равна  $\nu_B \approx 10^{14} \text{ с}^{-1}$ .

2. Таким образом, между точками 1 и 2 частица будет двигаться по ломаной линии.

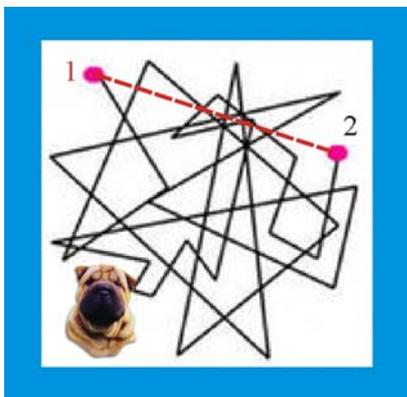


Рис. 76.2. Детали движения в более мелком масштабе времени

77. Дым представляет собой частицы сажи, взвешенные в воздухе. Твёрдые частицы сажи долго не падают вниз потому, что:

- 1) частицы совершают броуновское движение;
- 2) температура частиц сажи больше температуры окружающего воздуха;
- 3) воздух выталкивает их вверх согласно закону Архимеда;
- 4) Земля не притягивает мелкие частицы.

### Решение

1. Частички сажи по размерам гораздо больше диаметра молекул воздуха, так, например диаметр молекулы азота  $N_2$  примерно равен  $d_0 \approx 3,3 \cdot 10^{-10}$  м, а частички сажи измеряются единицами и десятками микрон, поэтому частички сажи получают от молекул, совершающих хаотическое тепловое движение, импульсы и тоже начинают двигаться хаотически, правда, с меньшими скоростями. Что существенно маскирует проявление силы тяжести и силы Архимеда.

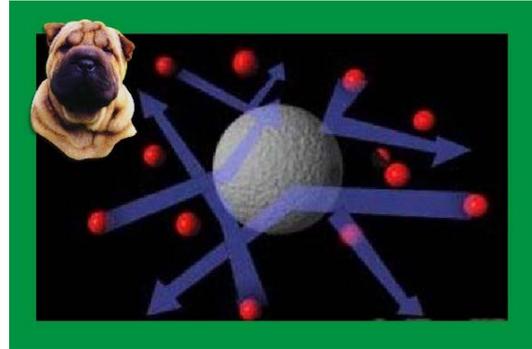


Рис. 77. Бомбардировка частицы

78. Приведена зависимость давления одноатомного идеального газа от его объёма. При переходе из состояния 1 в состояние 2 газом была совершена работа  $A = 5$  кДж. Определить количество теплоты полученное газом.

### Решение

1. Процесс изотермический, потому что:

$$pV = \text{const};$$

2. Изменение внутренней энергии газа не происходит, потому что:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T; \quad \Delta T = 0;$$

3. Всё подводимое к газу тепло преобразуется в работу

$$\delta Q = A = 5 \text{ кДж.}$$

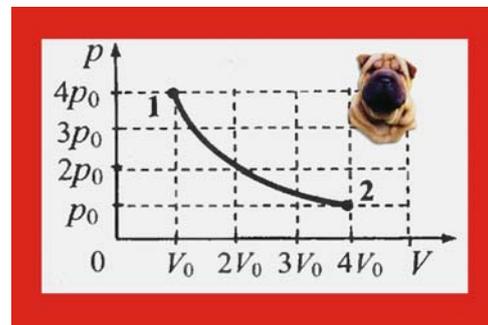


Рис. 78. зависимость давления от объёма

79. Четыре металлических бруска положили вплотную друг к другу. Стрелками показано направление теплопередачи от бруска к бруску. Температуры брусков в данный момент  $100^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ . какой из брусков имеет температуру  $60^\circ\text{C}$ ?

### Решение

1. Будем считать, что перенос теплоты между брусками подчиняется закону Фурье

$$q_t = -K \frac{\Delta T}{\Delta x},$$

где  $q_t$  – поток тепла в единицу времени,  $K$  – коэффициент теплопроводности,  $\Delta T/\Delta x$  – градиент температуры в направлении переноса тепла.

2. В соответствии с приведенной схемой, минимальную температуру  $40^\circ\text{C}$  имеет брусок А, максимальную  $100^\circ\text{C}$  – брусок D. Поскольку имеет место теплопередача между бруском С и В, то  $T_C > T_B \Rightarrow T_B = 333 \text{ K}$  ( $t = 60^\circ\text{C}$ ).

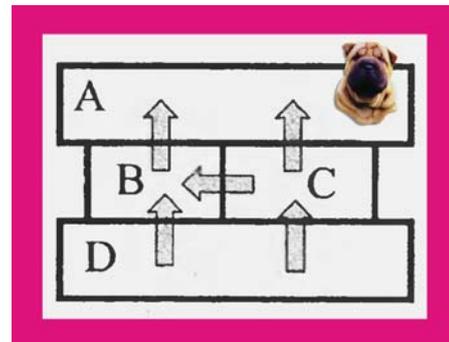


Рис. 79. Теплопередача брусков

80. Некоторое вещество массой  $m$  и молярной массой  $\mu$  содержит  $N$  молекул. Определить количество вещества.

### Решение

1. Количество вещества  $\nu$ , измеряемое в молях, определяется как

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{m_0 N}{\mu} = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} = \frac{N}{N_A},$$

где  $N_A$  – число Авогадро, количество молекул в одном моле любого вещества,  $m_0$  – масса одной молекулы.

---

81. Как изменилась средняя кинетическая энергия молекул одноатомного идеального газа при увеличении его абсолютной температуры в два раза?

### Решение

1. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа определяется как:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} k_B T,$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $i$  – число степеней свободы молекулы (для одноатомного газа  $i = 3$ ).

2. При увеличении абсолютной температуры  $T$  в два раза, средняя величина кинетической энергии увеличится тоже в два раза.

---

82. Как изменится давление идеального газа, если в данном объёме скорость каждой молекулы газа увеличить в 2 раза, а концентрацию молекул оставить прежней?

### Решение

1. Давление идеального газа в соответствии с основным уравнением МКТ определяется как:

$$p = nk_B T.$$

2. Средняя арифметическая скорость молекул идеального газа:

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

3. Для того чтобы скорость увеличилась в два раза, температуру необходимо увеличить в четыре раза, значит и давление возрастёт тоже в четыре раза.

---

83. Одноатомный идеальный газ неизменной массы в изотермическом процессе совершает работу  $A > 0$ . Как изменяются в этом процессе объём, давление и внутренняя энергия газа:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

### Решение

1. Работа в изотермическом процессе определяется уравнениями

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}; \quad A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2},$$

из которых видно, что при совершении положительной работы объём должен увеличиваться, а давление – уменьшаться.

2. Внутренняя энергия не изменяется т.к.

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T; \quad \Delta T = 0;$$

Объём газа	Давление газа	Внутренняя энергия газа
1	2	3

84. В сосуде неизменного объёма находились при комнатной температуре смесь двух идеальных газов, по  $\nu_0 = 1$  моль каждого. Половину содержимого сосуда выпустили, а затем добавили в сосуд  $\nu_1 = 1$  первого газа. Как изменились в результате: парциальные давление газов и их суммарное давление, если температура в сосуде поддерживалась неизменной.

Для каждой величины определить соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

### Решение

1. Парциальные давления зависят от концентрации молекул

$$p_1 = n_1 k_B T; \quad p_2 = n_2 k_B T;$$

2 Концентрация молекул в процессе меняется: после удаления половины смеси в объеме останется по  $\nu_1 = \nu_2 = 0,5$  моль, после добавления первого газа ситуация поменяется. Первого газа станет  $\nu_2 = 1,5$  моль. Значит, парциальное давление первого газа увеличится, а второго газа уменьшится.

3. Общее количество вещества сохраняется, поэтому

$$p_0 = p_1 + p_2 = \text{const};$$

Парциальное давление первого газа	Парциальное давление второго газа	Давление смеси газов с в осуде
1	2	3

85. В стеклянный сосуд закачивают воздух, одновременно нагревая его. При этом абсолютная температура воздуха в сосуде повысилась в 3 раза, а его давление выросло в 5 раз. Во сколько  $\zeta$  раз увеличилась масса воздуха в сосуде?

### Решение

1. Составим систему из уравнений состояния, считая воздух, идеальным газом

$$\left. \begin{aligned} pV &= \frac{m_1}{\mu} RT; \\ 5pV &= \frac{m_2}{\mu} R3T; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{5} = \frac{m_1}{m_2} \frac{1}{3}; \quad \zeta = \frac{m_2}{m_1} = \frac{5}{3};$$

86. Давление  $\nu = 3$  моль водорода в сосуде при температуре  $T = 300$  К равно  $p_1$ . Каково станет давление 1 моль водорода при вдвое большей температуре?

Решение

1. Запишем систему уравнений Клапейрона – Менделеева для двух заданных состояний идеального газа водорода

$$\left. \begin{aligned} p_1 V &= \nu RT; \\ p_2 V &= \frac{1}{3} \nu R 2T; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{2}{3}; \quad p_2 = \frac{2}{3} p_1;$$

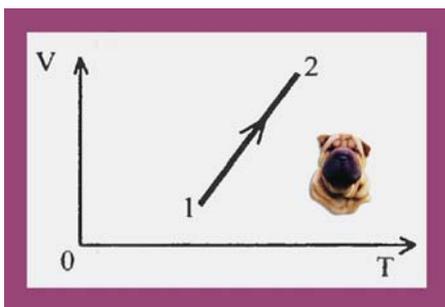


Рис. 87.1. Изменение состояния

87. Как изменится давление данного количества идеального газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?

Решение

1. Запишем уравнение состояния как зависимость объёма от температуры

$$pV = \nu RT;$$

$$V = \frac{\nu RT}{p}; \quad V = aT;$$

2. Поскольку зависимость  $V = f(T)$  прямая линия, то коэффициент  $a$  должен быть постоянной величиной, т.е.  $p = \text{const}$ .

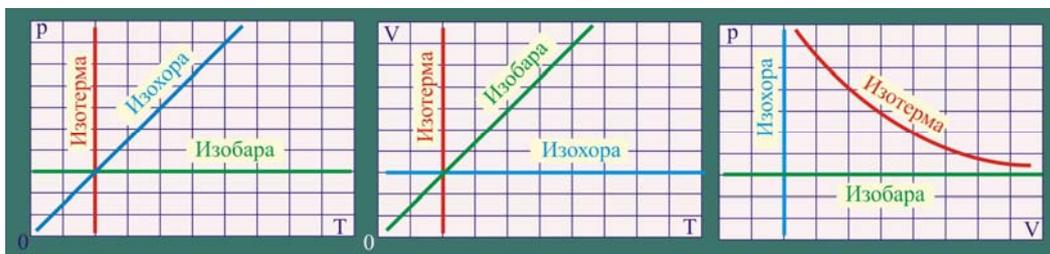


Рис. 87.2. Графики изопроцессов в различных координатах

88. В сосуде, закрытом поршнем, находится идеальный газ. Задан график изменения его состояния. Как изменяется объём газа при его переходе из состояния А в состояние В?

Решение

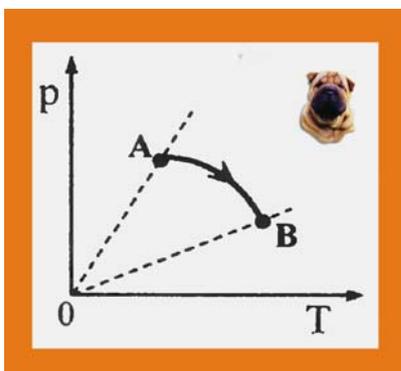


Рис. 88. Изменение состояния

1. Пунктирные линии представляют собой две изоchoры, причём  $V_A < V_B$  потому, что в соответствии с уравнением состояния

$$pV = \nu RT;$$

$$p = \frac{\nu RT}{V},$$

уменьшение давления при увеличении температуры становится возможным только при увеличении объёма.

89. Установите соответствие между процессами в идеальном газе и формулами, которыми они описываются. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

ПРОЦЕССЫ		ФОРМУЛЫ
А) Изобарный процесс при $N = const$		1) $\frac{p}{T} = const$
Б) Изотермический процесс при $N = const$		2) $\frac{V}{T} = const$
		3) $pV = const$
		4) $Q = 0$

Рис. 89. Соответствие процессов и уравнений

### Решение

1. Уравнение изобарного процесса

$$\left. \begin{array}{l} pV_1 = \nu RT_1; \\ pV_2 = \nu RT_2; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = const;$$

2. Уравнение изотермического процесса

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V_1 = \nu RT; \\ p_2 V_2 = \nu RT; \end{array} \right\} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 = const;$$

А	Б
2	3

90. Как изменится температура идеального газа, если увеличить его объём в 2 раза при осуществлении процесса, описываемого уравнением  $pV^2 = const$ ?

### Решение

1. Уравнения изменения состояния в заданных условиях

$$\left. \begin{array}{l} pV^2 = \nu RT_1; \\ p2V^2 = \nu RT_2; \end{array} \right\} \Rightarrow T_2 = \frac{T_1}{2},$$

температура уменьшится в два раза.

91. Задан график процесса, проведенного над  $\nu = 1$  моль идеального газа. Найти отношение температур  $T_3/T_2$ .

### Решение

1. Составим уравнения состояния на основе графика

$$\left. \begin{array}{l} 2p_0 3V_0 = \nu RT_2; \\ 3p_0 5V_0 = \nu RT_3; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{15}{6} = 2,5.$$

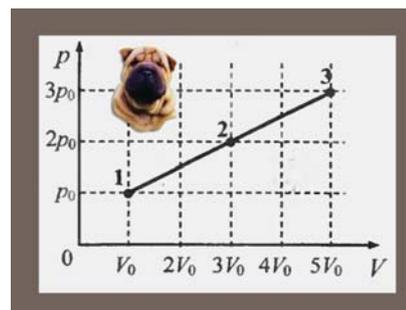


Рис. 90. График процесса

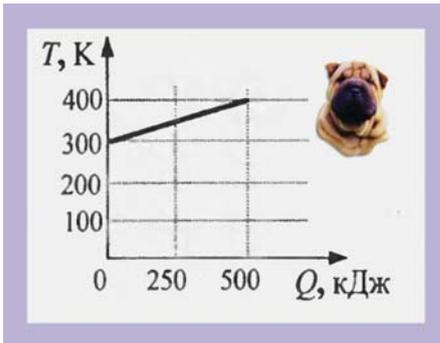


Рис. 92. Температура и тепло

92. Дана зависимость температуры некоего твёрдого тела массой  $m = 2$  кг от полученного им количества тепла. Какова удельная теплоёмкость вещества этого тела?

**Решение**

1. Удельная теплоёмкость вещества по определению равна:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{5 \cdot 10^5}{2 \cdot 100} = 2,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

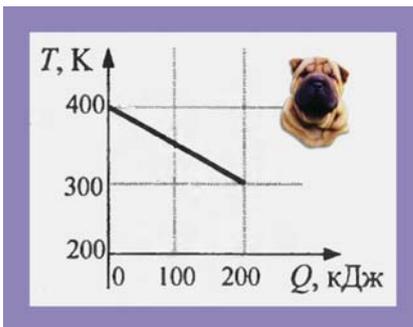


Рис. 93. Удельная теплоёмкость

93. Дан график зависимости температуры твёрдого тела массой  $m = 4$  кг от отданного им количества теплоты. Какова удельная теплоёмкость этого тела?

**Решение**

1. Удельная теплоёмкость вещества по определению равна:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{2 \cdot 10^5}{4 \cdot 100} = 500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

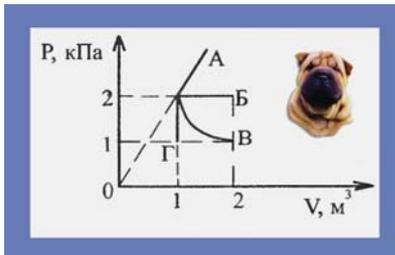


Рис. 94. Изотермический процесс

94. Какой из графиков, соответствует процессу, проведенному при постоянной температуре?

**Решение**

1. Следует обратить внимание на то, судя по заданному графику,

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

что характерно для изотермического процесса, характеризующегося кривой B, о том же свидетельствуют данные рис. 87.2.

95. В одном из опытов стали нагревать воздух в сосуде постоянного объёма. При этом температура воздуха в сосуде повысилась в 3 раза, а давление выросло в 2 раза. Оказалось, что кран у сосуда был закрыт плохо, и через него просачивался воздух. Во сколько раз изменилась масса воздуха в сосуде?

**Решение**

1. Уравнения состояния до нагревания и после этого процесса

$$\left. \begin{aligned} pV &= \frac{m_1}{\mu} RT; \\ 3 = 2pV &= \frac{m_2}{\mu} R3T; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{m_1}{m_2} = 1,5; \quad m_1 = 1,5m_2;$$

96. В цилиндрическом сосуде, объём которого можно изменять при помощи поршня, находится идеальный газ при давлении  $p_1 = 5 \cdot 10^5$  Па и температуре  $T_1 = 300$  К. Как надо изменить объём газа, не меняя его температуры, чтобы давление уменьшилось до  $p_2 = 2,5 \cdot 10^5$  Па?

### Решение

1. Изменение состояния газа должно протекать по изотермической схеме

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V_1 = \nu RT; \\ p_2 V_2 = \nu RT; \end{array} \right\} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{5 \cdot 10^5}{2,5 \cdot 10^5} = 2;$$

97. Во внешний стакан калориметра была налита горячая вода, во внутренний стакан – холодная вода. Приведен график, построенный на основе экспериментального измерения температур от времени. Какова наиболее вероятная температура горячей и холодной воды через продолжительное время?

### Решение

1. В соответствии с третьим началом термодинамики, все процессы стремятся к термодинамическому равновесию, т.е. к уменьшению разности температур между отдельными телами.

2. Уравнение теплового баланса позволяет установить общую температуру горячей и холодной воды, эта температура для обеих жидкостей должна стать одинаковой после окончания процесса теплопередачи

$$cm_1(T_1 - \theta) = cm_2(\theta - T_2),$$

т.е. горячая вода остывает, а холодная нагревается.

3. Судя по экспериментальному графику с течением времени наиболее вероятной температурой является  $\theta = 50$  °С. После чего калориметр начнёт приходить в состояние теплового равновесия с окружающей средой.

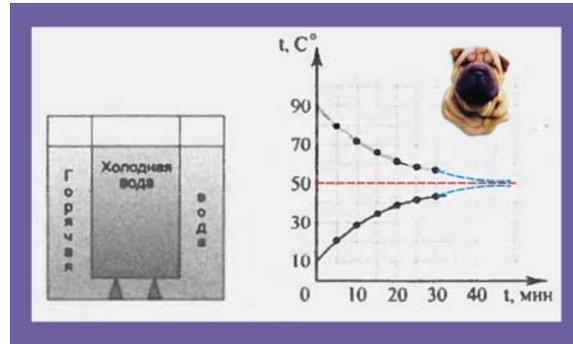


Рис. 97. Температуры в калориметре

98. Даны графики изменения температуры четырёх тел одинаковой массы по мере поглощения ими тепловой энергии. В начальный момент тела находились в твёрдом состоянии. Какой из графиков соответствует твёрдому телу с наименьшей теплоёмкостью?

### Решение

1. Удельная теплоёмкость вещества определяется уравнением

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T}; \Rightarrow c \approx \frac{\Delta Q}{\Delta T};$$

$$c \cong \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha};$$

Чем больше угол наклона прямой  $T=f(Q)$ , тем меньше теплоёмкость, наименьшая удельная теплоёмкость у тела 1.

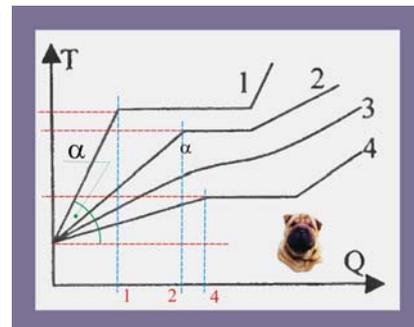


Рис. 98. Поглощение энергии

99. С точки зрения физики имеет смысл изменять температуру:

- 1) электрона;
- 2) атома;
- 3) молекулы;
- 4) жидких, твёрдых и газообразных тел?

### Решение

1. Измерение температуры на первых трёх объектах не имеет физического смысла, потому что температура в современном представлении является физической величиной, характеризующей, приходящуюся на одну степень свободы среднюю энергию макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

2. По определению П.Л. Капицы: «Мерилом температуры является не само движение, а хаотичность этого движения. Хаотичность состояния тела определяет его температурное состояние, и эта идея (которая впервые была разработана Больцманом), что определённое температурное состояние тела вовсе не определяется энергией движения, но хаотичностью этого движения, и является тем новым понятием в описании температурных явлений, которым мы должны пользоваться»

3. Температура является макропараметром, поэтому её измерение имеет смысл в макросистемах (жидких, твёрдых или газообразных), где одновременно происходит огромное число соударений молекул или атомов. Температура – это исключительно статистическое понятие.

---

100. Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым эти величины определяются.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ	ФОРМУЛЫ
А) удельная теплота плавления	1) $\frac{Q}{m(t_2 - t_1)}$
Б) количество теплоты, необходимое для нагревания вещества в данном агрегатном состоянии	2) $\frac{Q}{m}$
В) количество теплоты, необходимое для плавления вещества при температуре плавления	3) $cm(t_2 - t_1)$
	4) $\lambda m$
	5) $\frac{Q}{c \cdot m}$



Рис. 100. Соответствие уравнений и физических величин

### Решение

1. Удельная теплота плавления

$$Q = \lambda m; \quad \lambda = \frac{Q}{m};$$

2. Количество теплоты, необходимое для нагревания вещества в данном агрегатном состоянии

$$Q = cm(t_2 - t_1);$$

3. Количество теплоты, необходимое для плавления вещества, находящегося при температуре плавления

$$Q = \lambda m;$$

А	Б	В
1	3	4

101. Абсолютная температура и объём одного моля идеального газа увеличились в три раза. Как изменилось при этом давление?

**Решение**

1. Из уравнений состояния идеального газа следует, что:

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V = \nu RT; \\ p_2 3V = \nu R 3T; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{3p_2}{p_1} = 3; \quad p_1 = p_2;$$

102. Какое количество теплоты нужно передать одному молю одноатомного газа, чтобы вдвое увеличить его объём в изобарном процессе, если начальная температура газа  $T$ .

**Решение**

1. При изобарном процессе подводимое к системе тепло расходуется на совершение работы и изменение внутренней энергии газа, в соответствии с первым началом термодинамики

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

2. Изменение внутренней энергии газа

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

3. Совершённая в процессе работа

$$p 2V = \nu RT; \Rightarrow A = \frac{1}{2} \nu RT;$$

4. Израсходованное на процесс количество тепла, с учётом  $\nu = 1$

$$\delta Q = \frac{3}{2} RT + \frac{1}{2} RT = \frac{5}{2} RT;$$

103. Подобрать во второй колонке примеры тепловых явлений, иллюстрирующие способы теплопередачи, указанные в первой колонке. Каждому элементу первого столбца подберите утверждение из второго столбца и впишите в таблицу цифры, обозначающие номера выбранных утверждений.

СПОСОБЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ	ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ
А) теплопроводность Б) излучение В) конвекция	1) Измерение температуры тела больного ртутным термометром 2) Высушивание белья, подвешенного над радиатором отопления или рядом со стенкой печи 3) Выжигание отверстия в бумаге с помощью луны в солнечный день

Рис. 103 Способы теплопередачи

А	Б	В
1	3	2

104. Определить работу газа за термодинамический цикл 1–2–3–4–1.

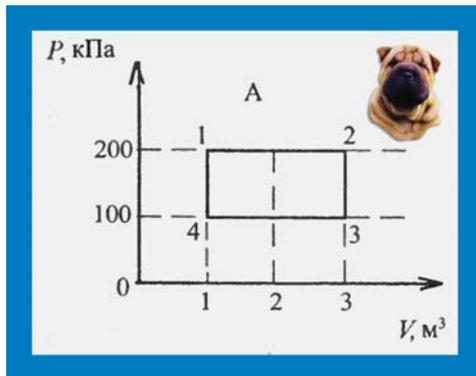


Рис. 104.1. Работа цикла

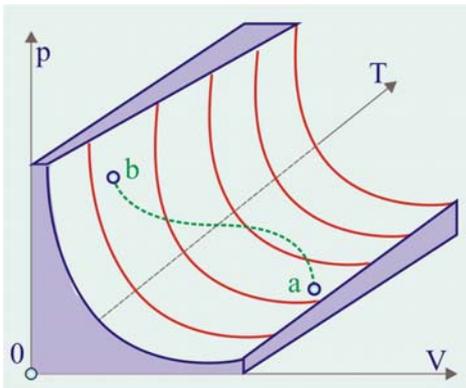


Рис. 104.2. Термодинамическая поверхность идеального газа

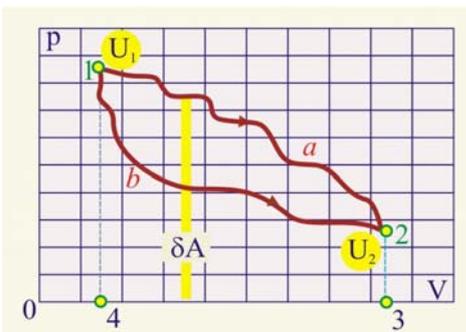


Рис. 104.3. pV – диаграмма газа

### Решение

1. В каждый момент времени состояние тела определяется всем многообразием его свойств, причём, изменение одного из них, как правило приводит к изменению других. Построение дальнейшей термодинамической модели поведения вещества осуществим на примере всё того же идеального газа, для которого всё многообразие параметров состояния можно свести к трём, т.е.

$$f(p, V, T) = 0,$$

все остальные свойства, включая электрические, магнитные, оптические и др. будут далее полагаться неизменными.

2. Геометрически уравнение состояния представляет собой некоторую поверхность (рис. 104.2), отнесённую к трём взаимно перпендикулярным осям координат  $\{p, V, T\}$ .

3. Каждое состояние вещества на этой термодинамической поверхности отображается некоторой точкой, например а, которая называется фигуративной точкой. При изменении состояния точка перемещается по термодинамической поверхности, например в положение b, описывая кривую ab. Проекция этой кривой на плоскости позволяют получить соответствующие изохоры  $(p, T)$ ,  $(V, T)$  – изобары и  $(p, V)$  – изотермы.

4. Рассмотрим pV – диаграмму некоторого термодинамического процесса (рис. 104.3) вследствие которого объект переводится из начального состояния 1 в конечное состояние 2.

состояние 1 характеризуется набором из трёх параметров: давления  $p$ , объёма  $V$  и температуры  $T$ . Кроме того, рассматриваемая масса газа в этом состоянии будет обладать внутренней энергией  $U_1$ .

5. Предположим далее, что газ получил возможность расширяться, совершая при этом работу. Почему при расширении газа будет совершаться механическая работа? Это можно показать, воспользовавшись традиционными представлениями о работе, заимствованными из классической механики. Рассмотрим цилиндр с термоизолированными стенками (адиабатная оболочка), заполненный идеальным газом и закрытый невесомым поршнем. Предположим, что первоначально давление в ограниченном объёме выше окружающего и равно  $p$ . Если поршень отпустить и допустить его перемещения без трения, то газ начнёт расширяться, причём на поверхность поршня будет действовать сила

$$F = pds.$$

6. Элементарная работа этой силы на перемещении поршня  $dx$  будет равна

$$\delta A = F dx = p ds dx = p dV .$$

7. Возвращаясь к рис. 104.3, вычислим работу при переводе исследуемого объёма газа из начального положения 1 в конечное положение 2, для чего кривую  $p = f(V)$  разобьём на большое число отрезков и на каждом из них применим уравнение  $\delta A$ . При суммировании элементарных работ, мы придём к следующему выражению

$$A_{1 \rightarrow 2} = \sum_{k=1}^{k=n} \delta A_k = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{k=n} p dV_k = \int_{V_1}^{V_2} p dV .$$

8. При увеличении объёма газа от  $V_1$  до  $V_2$  совершается работа  $A_{1 \rightarrow 2}$ . Поскольку закон сохранения энергии никто не отменял и для этого случая, то совершение работы должно сопровождаться уменьшением внутренней энергии газа, больше энергии взяться неоткуда. На этом основании работу можно сопоставить с изменением внутренней энергии

$$A_{1 \rightarrow 2} = -(U_2 - U_1) = U_1 - U_2 .$$

9. Следует оговориться, что в принципе работа может совершаться не только за счёт уменьшения внутренней энергии газа. Если оболочку, ограничивающую рассматриваемый объём лишить теплоизоляционных свойств и нагревать, то работа расширения будет совершаться частично или полностью за счёт энергии внешнего источника. Ещё один вариант. Закрепим поршень (рис. 104.4) и подогреем газ от внешнего источника тепла. Объём в этом случае меняться не будет, следовательно работа не совершается. В этом случае вся энергия внешнего источника станет трансформироваться во внутреннюю энергию газа.

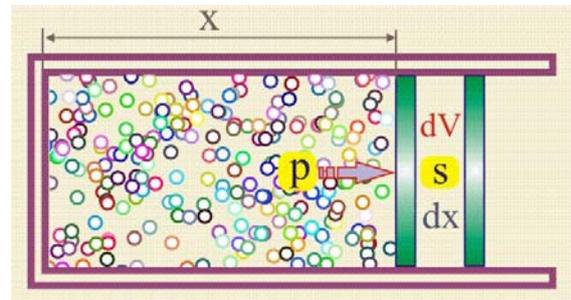


Рис. 104.4. Работа газа при расширении

10. На основании проведенных рассуждений закон сохранения энергии в его термодинамическом варианте можно математически выразить следующим уравнением

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

которое в системе СИ, где количество тепла  $Q$ , работа  $A$ , внутренняя энергия  $U$  измеряются в джоулях, уравнение первого начала термодинамики принимает вид

$$\delta Q = dU + \delta A .$$

11. При сообщении газу количества тепла  $\delta Q$  и совершении над ним внешними силами работы  $\delta A^*$ , возможно и такое, уравнение первого начала переписывается следующим образом

$$\delta Q + \delta A^* = dU .$$

12. Интегральная форма первого начала получается при совмещении уравнений теплоты и внутренней энергии

$$Q = U_2 - U_1 + \int_{V_1}^{V_2} p dV .$$

13. К ситуации описываемой последним уравнением можно прийти подогревая газ в цилиндре и одновременно сжимая его поршнем, движимым внешними силами чисто механического свойства. Другими словами, подводя

теплота и совершаемая над газом работа преобразуются во внутреннюю энергию, что подтверждает предположение о том, что внутренняя энергия однозначно определяется термодинамическим состоянием тела, в данном случае в газообразном состоянии.

14. Мечта всех энтузиастов *perpetuum mobile*, чтобы при одинаковом наборе макропараметров  $\{p, V, T\}$  тело имело бы разные внутренние энергии. В этом случае на основании совершенно справедливого уравнения для  $Q$  можно было бы извлекать энергию в виде «шаровой» работы. Несмотря на многочисленные попытки создать желанную ситуацию не удалось, ибо законы природы неуемимы и управляются отнюдь не человеческими эмоциями.

15. Внутренняя энергия является однозначной функцией состояния вещества и представляется полным дифференциалом, что и продиктовало обозначение  $dU$ . А вот произведенная работа  $\delta A$  и соответствующее количество тепла  $\delta Q$  полными дифференциалами не являются. Полная работа  $A_{1 \rightarrow 2}$  геометрически отображается площадью криволинейной трапеции 1-2-3-4-1 (рис. 104.1) и зависит от способа, которым осуществляется перевод системы из начального положения в конечное.

16. Величины  $\delta A$  и  $\delta Q$  не являются полными дифференциалами, они называются функционалами и зависят от вида функции  $p = f(V)$ , описывающий переход из начального положения в конечное положение.

17. Первое начало термодинамики позволяет более точно определить понятие количества тепла. Количество тепла  $\delta Q$  есть количество внутренней энергии, переданной от одного тела другому без совершения работы первым телом над вторым. Из этого следует, что количество тепла понятие, проявляющееся только в каком либо конкретном процессе, т.е количество тепла является формой передачи энергии. Количество тепла нельзя рассматривать как некоторый самостоятельный вид энергии, содержащийся в веществе, точно так же как бессмысленно говорить о количестве, содержащейся в теле работы

18. В подавляющем большинстве энергетическая сущность нашей теперешней цивилизации заключается в превращении тепла в работу. Все тепловые машины, включая двигатели внутреннего сгорания, то и делают, что внутреннюю энергию углеводородных топлив превращают в тепло, весьма не эффективно далее организуя трансформацию тепла в механическую работу.

19. С позиций молекулярно-кинетической теории тепловые машины должны «уметь» кинетическую энергию теплового хаотического движения молекул вещества превращать в полезную работу. Поскольку хаотическое тепловое движение молекул и атомов есть естественное состояние любого вещества, то энергии в окружающем нас пространстве должно быть не меряно, это действительно так. Однако в большинстве своём эта энергия абсолютно бесполезна по причине невозможности превращения её в работу. Эту энергию нельзя даже рассматривать в качестве гипотетических запасов, которые когда-либо, когда люди станут сильно умными, может быть использована для производства работы.

20. Возьмём кусок стали массой  $m = 1$  кг и нагреем его на  $\Delta T = 1000$  °К, при этом его внутренняя энергия изменится на величину

$$\Delta U \approx cm\Delta T \approx 460 \cdot 1 \cdot 10^3 \approx 4,6 \cdot 10^5 \text{ Дж},$$

где  $c \cong 460$  Дж/(кг·К) – удельная теплоёмкость стали. Оценим далее, на какую высоту необходимо поднять не нагретый этот кусок стали над поверхностью земли, чтобы он приобрёл такую же величину потенциальной энергии

$$\Delta U = mgh, \quad h = \frac{\Delta U}{mg} = \frac{4,6 \cdot 10^5}{1 \cdot 10} \approx 4,6 \cdot 10^4 \text{ м}.$$

21. Но вот что замечательно, нагретый до столь высокой температуры типичный образец вещества, ни при каких обстоятельствах не отправится в полёт, а будет смиренно лежать там, куда его поместили и растрчивать свою избыточную внутреннюю энергию окружающему пространству, переходя в состояние теплового равновесия. Стремление к равновесию является естественным направлением хода всех природных и технических процессов. Об этом более подробный разговор ещё впереди. Однако следует особо подчеркнуть, что пришедшие в состояние равновесия тела, покинуть это состояние без влияния извне не могут.

22. Проведенные рассуждения и оценки говорят о том, что имеющиеся вокруг нас фантастические запасы энергии не могут превратиться в механическое движение ни при каких обстоятельствах. Печально конечно, а может, если вдуматься и нет. Уж больно человечество неосторожно в своих играх с источниками энергии. Следуя далее Ландау, Китайгородскому оценим энергетические изменения нашей планеты при понижении её средней температуры всего на  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{K}$

$$\Delta U = cm\Delta T \approx 920 \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot 1 \approx 5,52 \cdot 10^{27} \text{ Дж},$$

где  $c \cong 920 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$  – средняя удельная теплоёмкость Земли. Так вот, полученное значение изменения внутренней энергии нашей планеты практически в миллиард раз больше, чем величина энергии, вырабатываемой в течение года всеми электростанциями на Земле. Именно от таких оценок цепенеет буйная фантазия энтузиастов вечного движения. Как же, стоит только придумать устройство, использующее для производства работы только охлаждение среды, и человек снова счастлив и беззаботен на пару миллионов лет, а может быть и побольше. Но физическое существо мироздания к подобному стремлению повторно без особого напряжения переселиться в Эдем, относится более чем категорично.

23. Как показано выше, работа цикла численно равна площади фигуры, образованной графиками изопроцессов, составляющих этот цикл. В соответствие с данным графиком процесса

$$A = \Delta p \Delta V = 10^5 \cdot 2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж};$$


---

105. Идеальный газ совершил работу  $A = 400 \text{ Дж}$  и при этом его внутренняя энергия увеличилась на  $\Delta U = 100 \text{ Дж}$ . Чему равно количество теплоты, полученное газом в этом процессе?

### Решение

1. Применяя к процессу первое начало термодинамики, получим

$$\delta Q = \Delta U + \delta A = 500 \text{ Дж}.$$


---

106. В цилиндре под поршнем находится вещество в твёрдом состоянии. Цилиндр помещается в печь с высокой температурой. На рис.106 приведен график изменения температуры тела в функции поглощаемого им тепла. Какие участки графика соответствуют нагреванию вещества в твёрдом состоянии и кипению этого вещества. Установить соответствие между тепловым процессом и участками графика

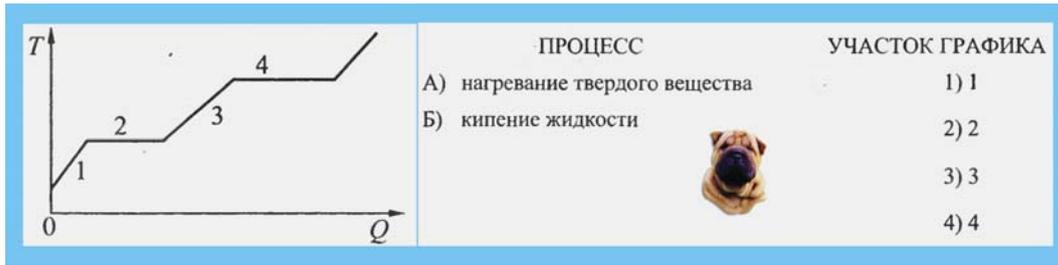


Рис.106. Соответствие процессов и графических представлений

### Решение

1. Нагревание вещества до температуры плавления протекает в соответствии с уравнением:

$$Q = cm\Delta T,$$

чему соответствует отрезок 1. В течение отрезка 2 всё тепло расходуется на плавление вещества, участок 3 – нагревание жидкости до температуры кипения, участок 4 – процесс превращения жидкости в пар (кипение), а далее пошел процесс нагревания пара.

А	Б
1	4

107. Газ последовательно перешёл из состояния 1 в состояние 2, а затем в состояние 3 и 4. На каком из участков процессе работа газа равна нулю?

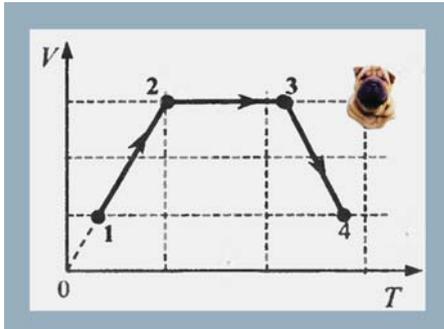


Рис. 107. Изменение состояния

### Решение

1. В общем случае работа при изменении состояния газа определяется уравнением

$$A_{1 \rightarrow 2} = \sum_{k=1}^{k=n} \delta A_k = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{k=n} p dV_k = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

2. Если объём газа не меняется, как это имеет место на участке графика 2 – 3, то работа на этом участке не совершается, всё подводимое тепло (изохорный процесс) трансформируется в изменение внутренней энергии газа

$$Q = U_3 - U_2 + \int_{V_2}^{V_3} p dV; \quad V_2 = V_3; \quad \Rightarrow \quad Q = \Delta U; \quad A = 0;$$

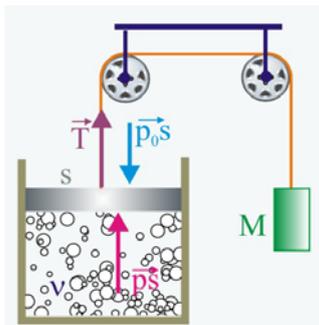


Рис. 108. Поршень с грузом

108. В цилиндре под невесомым поршнем площадью  $s = 10^{-2} \text{ м}^2$  находится  $\nu = 1$  моль идеального газа при температуре  $T_1 = 373 \text{ }^\circ\text{К}$ . К поршню через два идеальных блока на невесомой и нерастяжимой нити подвешен груз массой  $M = 17 \text{ кг}$ . На какую высоту  $\Delta h$  поднимется груз, если газ медленно охладить до температуры  $T_2 = 273 \text{ }^\circ\text{К}$ ? Трение в системе отсутствует.

### Решение

1. Условие равновесия поршня:

$$p = p_0 - \frac{Mg}{s};$$

2. При медленном изменении температуры давление под поршнем будет оставаться постоянным, потому что будет изменяться объём. Для одного моля газа уравнение Клапейрона – Менделеева даёт основания записать:

$$\left. \begin{array}{l} pV_1 = RT_1; \\ pV_2 = RT_2; \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = \frac{RT_1}{p}; \quad V_2 = \frac{RT_2}{p};$$

3. Разность объёмов представится следующим образом:

$$V_1 - V_2 = \Delta h s$$

4. Образует систему уравнений, совместное решение которых даёт  $\Delta h$

$$\left. \begin{array}{l} p = p_0 - \frac{Mg}{s}; \\ V_1 = \frac{RT_1}{p}; \\ V_2 = \frac{RT_2}{p}; \\ V_1 - V_2 = \Delta h s \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta h = \frac{R(T_1 - T_2)}{p_0 s - Mg} \cong \frac{8,3(373 - 273)}{10^5 \cdot 10^{-2} - 17 \cdot 10} \cong 1 \text{ м};$$

109. Внутренняя энергия идеального газа в герметичном сосуде уменьшается при:

- 1) уменьшении потенциальной энергии сосуда;
- 2) изохорном охлаждении;
- 3) уменьшении кинетической энергии сосуда;
4. Изотермическом сжатии?

### Решение

1. Изменение внутренней энергии идеального газа определяется уравнением

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

уменьшение внутренней энергии может происходить при уменьшении температуры газа, т.е. при изохорном охлаждении.

110. На  $pT$  – диаграмме показан процесс изменения состояния идеального газа, в течение которого газ отдаёт  $\delta Q = 50$  кДж теплоты. Определить работу внешних сил.

### Решение

1. 1. Применяя к процессу первое начало термодинамики, получим

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

$$T = \text{const}; \Rightarrow \Delta U = 0; .$$

$$\delta A = \delta Q = 50 \text{ кДж}$$

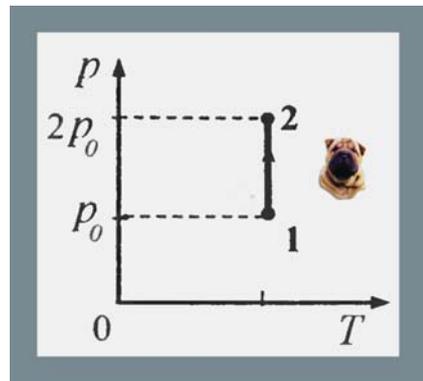


Рис. 110. Работа внешних сил

111. Одноатомный идеальный газ в количестве  $\nu = 6$  молей поглощает некоторое количество теплоты  $Q$ . При этом температура газа повышается на  $\Delta T = 20$  К. Газ в этом процессе совершает работу  $\delta A = 1$  кДж. Определить поглощённое газом количество теплоты.

**Решение**

1. Подводимая к газу тепловая энергия расходуется на совершение работы и изменение внутренней энергии газа

$$\delta Q = \Delta U + \delta A = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + \delta A = 1,5 \cdot 6 \cdot 8,3 \cdot 20 + 1 \cdot 10^3 = 2494 \text{ Дж} \approx 2,5 \text{ кДж.}$$

112. Приведен график зависимости давления идеального одноатомного газа от его объёма. При изменении состояния газ получил  $\delta Q = 500$  кДж теплоты. Что при этом произошло с внутренней энергией газа?

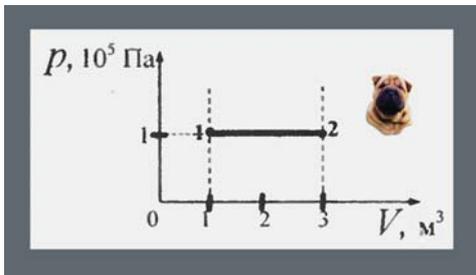


Рис. 112. Зависимость давления газа от объёма

**Решение**

1. Работа произведённая над газом при увеличении его объёма

$$\delta A = p \Delta V = 1 \cdot 10^5 \cdot 2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж ;}$$

2. Увеличение внутренней энергии в этом процессе составит

$$\Delta U = \delta Q - \delta A = 3 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

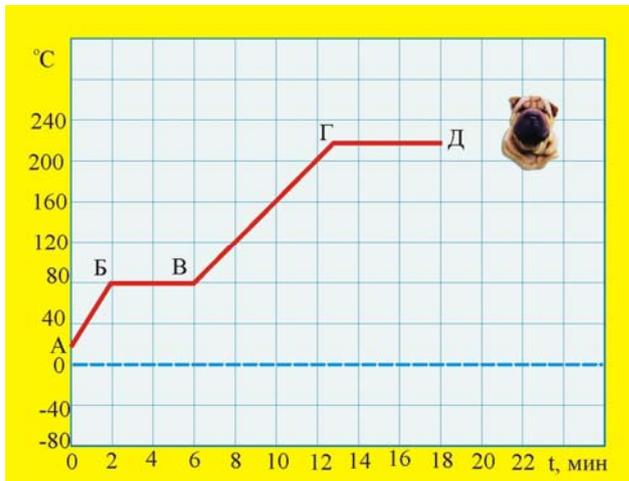


Рис. 113.1. Нагревание вещества

113. На рис. 113.1 приведена кривая нагревания кристаллического вещества массой  $m$  при постоянной мощности теплопередачи к нему. Поставить в соответствие участки кривых и формул для вычисления количества подводимого тепла, приняв обозначения:  $c$  – удельная теплоёмкость,  $\lambda$  – удельная теплота плавления,  $r$  – удельная теплота парообразования.

Участок (или участки) кривой нагревания	Формула для вычисления количества теплоты, для проведения процесса с веществом массы $m$
А) АБ	1) $cm (t_{пл} - t_A)$
Б) ГД	2) $\lambda m$
В) БВ	3) $cm (t_{кун} - t_{пл})$
	4) $rm$

Рис. 113.2. Соответствие процессов и формул

### Решение

1. Участок АБ соответствует нагреванию вещества в твёрдом состоянии

$$Q_{AB} = cm(t_{\text{пл}} - t_A);$$

2. Участок БВ всё подводимое тепло расходуется на плавление вещества

$$Q_{BB} = \lambda m;$$

3. Участок ВГ – нагревание вещества в жидком состоянии

$$Q_{BG} = cm(t_{\text{кип}} - t_{\text{пл}});$$

4. Участок ГД испарение жидкости при температуре кипения

$$Q_{GD} = mr;$$

А	Б	В
1	4	2

114. На  $V\Gamma$  – диаграмме представлена зависимость объёма идеального газа постоянной массы от абсолютной температуры. Как изменяется давление в процессе 1–2–3?

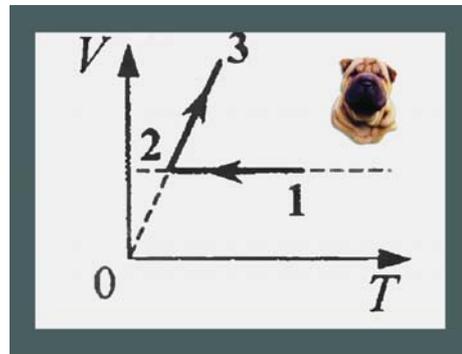


Рис. 114.1.  $V\Gamma$  – диаграмма

### Решение

1. Участок 2–3 является изобарой (рис. 114.2), поэтому давление не меняется

$$\left. \begin{array}{l} pV_1 = \nu RT_1; \\ pV_2 = \nu RT_2; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2};$$

2. Участок 1–2 представляется изохорой

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V = \nu RT_1; \\ p_2 V = \nu RT_2; \end{array} \right\} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1 T_1}{T_2}; \quad T_1 > T_2; \Rightarrow p_1 > p_2;$$

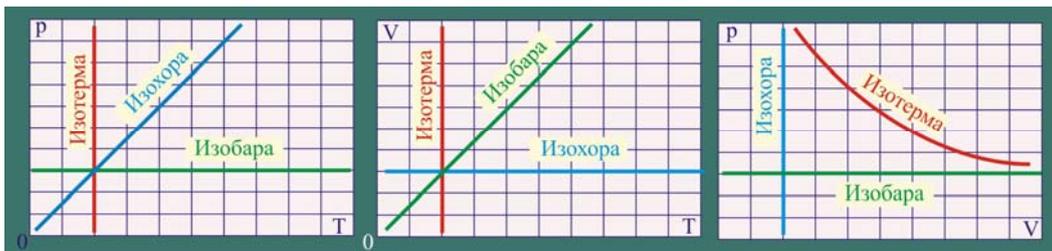


Рис. 114.2. Графики изопроцессов в различных координатах

115. На рис. 115 показано, как меняется давление идеального газа в зависимости от его объёма при переходе из состояния 1 в состояние 2, а затем в состояние 3. Каково отношение работ газа  $A_{1 \rightarrow 2}/A_{2 \rightarrow 3}$  на этих двух отрезках  $pV$  – диаграммы?

### Решение

1. Примем каждое деление графика за условную единицу давления и объёма. В этом случае работа на участке диаграммы 1–2 определится как

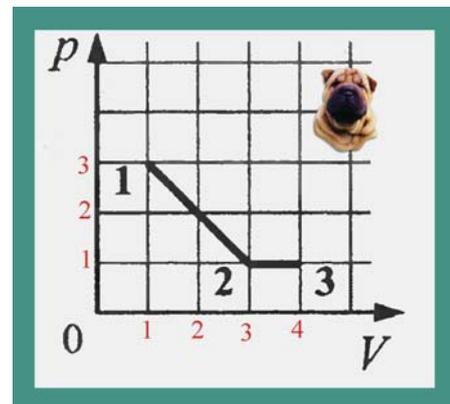


Рис. 115. Изменение давления

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} \Delta p \Delta V = 2p2V = 4pV ;$$

2. На участке 2–3

$$A_{2 \rightarrow 3} = p \Delta V = pV ;$$

3. Отношение работ

$$\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{A_{2 \rightarrow 3}} = 4 ;$$

116. Сосуд разделён перегородкой на две равные части. В левой половине сосуда находится  $N_1 = 10^{20}$  молекул газа, а в правой половине  $N_2 = 2 \cdot 10^{20}$  молекул. Сколько примерно окажется молекул в левой половине, после того как перегородку убрали?

### Решение

1. В соответствие с закономерностью диффузионного процесса

$$j = -D \frac{\Delta n}{\Delta x},$$

где  $j$  – количество молекул, перемещающихся в единицу времени в направлении  $X$  через единичную площадку, расположенную перпендикулярно вектору скорости молекул,  $D = 1/3(\langle v \rangle \langle \lambda \rangle)$  – коэффициент диффузии,  $\Delta n$  – изменение концентрации молекул в направлении  $X$ .

2. После удаления перегородки начнётся процесс диффузии, молекулы из правой части будут перемещаться в левую часть, пока  $\Delta n \cong 0$

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2} \cong 1,5 \cdot 10^5 ;$$

117. При работе двигателя внутреннего сгорания автомобиля энергия, выделяющаяся при сгорании топлива:

- 1) полностью превращается в механическую энергию транспортного средства;
- 2) частично превращается в механическую энергию;
- 3) полностью превращается во внутреннюю энергию выхлопных газов;
- 4) полностью превращается в кинетическую энергию выхлопных газов?

### Решение

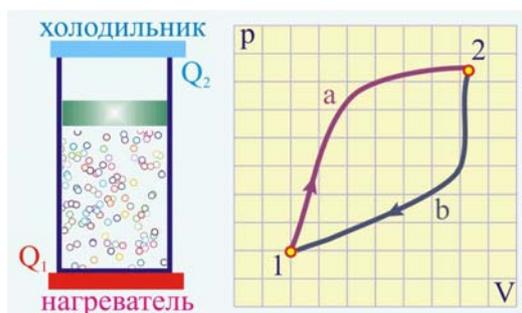


Рис. 117.1. Круговой процесс

1. Рассмотрим идеальный газ, находящийся в цилиндрическом сосуде под массивным поршнем (рис. 117.1). Если дно цилиндра привести на некоторое время в соприкосновение с телом, обладающим большей, чем окружающая среда температурой (нагревателем), то газ начнёт расширяться, совершая работу, связанную с увеличением потенциальной энергии поршня..

В стадии нагревания изменение состояния газа (рабочего тела) можно охарактеризовать на  $pV$  – диаграмме кривой 1a2. Первое начало термодинами-

ки позволяет записать следующее уравнение подобающее рассматриваемой ситуации

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1 .$$

2. Если в верхней точке своей прямолинейной траектории поршень соприкоснется с телом, температура которого ниже температуры газа (холодильником), произойдет охлаждение газа, что приведет к уменьшению его объема. Газ из состояния 2 по кривой 2b1 вернется в исходное состояние 1, при этом

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2 .$$

3. Совмещая уравнения, получим

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2 .$$

Уравнение демонстрирует, что рассматриваемое устройство совершило круговой процесс, при котором, нагреватель отдал рабочему телу тепло  $Q_1$ , а холодильник приобрел тепло в количестве  $Q_2$ . Экономический коэффициент полезного действия тепловой машины можно представить традиционным образом

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} .$$

4. Вот тут бы энтузиастам Perpetuum mobile второго рода и призадуматься, уяснив, что бесхитрое и беспристрастное уравнение никаких шансов на создание машины с  $\eta \cong 1$  не оставляет. Во времена французской революции в 1824 г. французский исследователь Сади Карно опубликовал работу «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» в которой рассмотрел в общем виде проблему «получения движения из тепла». Рассматривая идеальный круговой процесс (цикл Карно), впервые показал, что полезную работу можно совершить лишь при переходе тепла от нагретого тела к более холодному. Выдвинул положение, что величина работы определяется только разностью температур нагревателя и холодильника и не зависит от природы рабочего тела (теорема Карно). Пришел к понятию механического эквивалента теплоты и сформулировал в общем виде закон сохранения энергии.

5. Второе начало термодинамики устанавливает направление течения и характер процессов, протекающих в окружающем нас мире. Существует несколько эквивалентных формулировок второго начала термодинамики.

6. Клаузиус второе начало сформулировал в виде постулата: «Процесс, при котором не происходит других изменений, кроме передачи теплоты от горячего тела к холодному, является необратимым, т.е. теплота не может перейти от холодного тела к горячему без каких-либо других изменений в системе». Другими словами, чтобы от холодного тела передать тепло горячему телу необходимо совершить работу за счет энергии внешнего источника.

7. Лорд Кельвин второе начало сформулировал следующим образом: «Процесс, при котором работа переходит в теплоту без каких-либо других изменений в системе, является необратимым, т.е. невозможно преобразовать в работу всю теплоту, взятую от источника с однородной температурой, не производя других изменений в системе».

8. Физический смысл второго начала термодинамики наиболее образно просматривается в формулировке Макса Планка: «Невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу».

9. Отметим, что в соответствии со вторым началом термодинамики, процесс, схема которого приведена на рис. 117.2 невозможен. Нельзя из резервуара извлекать некоторое количество тепла  $Q_1$  и передавать его рабочему телу, ко-



Рис. 117.2. Нереальная схема теплового процесса

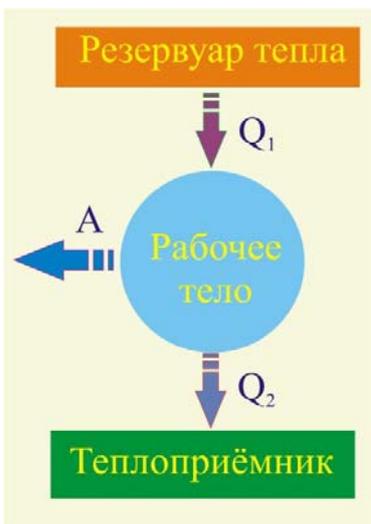


Рис. 117.3. Реальная схема теплового процесса

торое бы совершило работу  $A$  и, осуществив полную трансформацию, вернулось бы в исходное состояние. Это противоречит, прежде всего, определению Планка, как впрочем, и всем остальным формулировкам.

10. Реальным в свете второго начала термодинамики является только такой процесс (рис. 117.3), при котором не всё тепло, полученное от резервуара, преобразуется в работу, а только его часть, в соответствии с уравнением  $\eta$ . Часть тепла  $Q_1$  не трансформированная в работу для осуществления кругового цикла должна быть передана теплоприёмнику (холодильнику). Величина  $Q_2$  представляет собой неиспользованную в цикле тепловую энергию. При осуществлении второй части цикла (обратного хода процесса)  $Q_2$  используется для сжатия рабочего тела и передачи теплоприёмнику. Таким образом, тепло  $Q_2$  не используется в машине, а рассеивается в окружающем пространстве.

11. Убедиться в справедливости приведенных рассуждений можно, заглянув под капот любого автомобиля, где обнаружится достаточно сложная система охлаждения, единственным назначением которой является компенсация тепловых потерь неминуемо возникающих при осуществлении замкнутого кругового процесса, при котором извлекается механическая работа, движущая авто.

12. Таким образом, в соответствии со вторым началом термодинамики для превращения теплоты

в работу необходимы два тела с различными температурами  $T_1$  и  $T_2$ . Если  $T_1 > T_2$ , то первое тело называется нагревателем, а второе – холодильником.

13. Из всего многообразия круговых термодинамических процессов выделяют, так называемый, цикл Карно, который позволяет получить максимально возможный коэффициент полезного действия. Всё фундаментальное и практическое значение второго начала термодинамики, пожалуй, впервые осознал Сади Карно, который занимался проектированием и строительством водяных двигателей. В это время во Франции уже начали появляться тепловые машины, построенные гениальными самоучками по наитию, но теоретически никак не обоснованные. Научный фундамент был ещё не создан.

14. Карно постулировал, что величина работы, получаемой в круговом цикле, определяется только разностью температур нагревателя и холодильника, при этом физические и иные свойства рабочего тела никакого влияния на коэффициент полезного действия цикла не оказывают. Далее, используя этот принцип, Карно придумал идеальный цикл тепловой машины, который обладает максимально возможным коэффициентом полезного действия. Цикл Карно (рис. 117.4) состоит из двух изотерм и двух адиабат. Процесс перехода из состояния  $A$  в состояние  $B$  представляет собой изотермическое расширение рабочего тела, при котором газ находится в тепловом контакте с нагревателем, обладающим температурой  $T_1$ . Переход из состояния  $B$  в состояние  $C$ , сопро-

вождается дальнейшим адиабатическим увеличением объёма при изоляции от окружающей среды. Переход из точки С в точку D представляется изотермическим сжатием газа, и, наконец, возвращение системы в исходную точку А протекает в виде адиабатического сжатия.

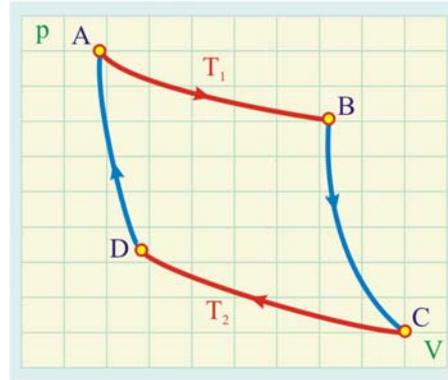


Рис. 117.4. Цикл Карно

15. При изотермическом сжатии, как известно, внутренняя энергия рабочего тела не меняется (температура неизменна), поэтому поглощаемое от нагревателя тепло в соответствии с первым началом термодинамики, преобразуется в работу

$$\Delta Q_1 = L = \int_{V_A}^{V_B} p dV = \frac{m}{\mu} RT_1 \frac{dV}{V},$$

где  $m$ ,  $\mu$  – масса и молярная масса газа. Поскольку в уравнении для изотермического процесса переменными являются объём и давление, то давление выражено через объём из уравнения Клапейрона – Менделеева

$$pV = \frac{m}{\mu} RT_1, \Rightarrow p = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{V}.$$

16. Интегрируя уравнение, получим

$$\Delta Q_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}.$$

Аналогичные уравнения запишем для перехода  $C \rightarrow D$

$$\Delta Q_{21} = \int_{V_C}^{V_D} p dV = \frac{m}{\mu} RT_2 \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}.$$

17. В рассматриваемых процессах  $V_B > V_A$  и  $V_D < V_C$ , из чего следует, что  $\Delta Q_1 > 0$ ,  $\Delta Q_2 < 0$ . Переходы  $B \rightarrow C$  и  $D \rightarrow A$  подчиняются уравнению адиабаты

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_2 V_C^{\gamma-1}, \quad T_2 V_C^{\gamma-1} = T_1 V_A^{\gamma-1}.$$

Решая совместно уравнения, получим

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = 0.$$

Из уравнения следует, что

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta Q_1} = -\frac{T_2}{T_1},$$

следовательно, подставив последнее соотношение в уравнение для коэффициента полезного действия  $\eta$ , получим величину максимально возможную величину коэффициента полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

18. Уравнению можно придать другой вид

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n},$$

т.е. коэффициент полезного действия тепловой машины определяется только разностью температур нагревателя и холодильника, такова правда жизни. Для увеличения эффективности теплового агрегата необходимо увеличить разность

температур нагревателя и холодильника. Этот суровый приговор похоронил все паровозы, потому что температура пара не может увеличиваться беспрельно, а вот в двигателях внутреннего сгорания температура при воспламенении выше, следовательно, они более эффективны, хотя, уравнение не позволяет увеличить коэффициент полезного действия более  $\eta \leq 40\%$ .

19. По большому счёту принцип действия современных силовых энергетических установок серьёзных изменений со времён их первоначального появления на энергетической арене не претерпел, как следствие и коэффициент полезного действия не увеличился существенно. Как уже отмечалось нами ранее, коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания не превышает 40 %. В табл. 117.1 приведены значения коэффициента полезного действия двигателей различных типов.

Таблица 117.1

Тип энергетической установки	КПД, %
Паровоз	8
Стационарная паровая машина	$\cong 15$
Турбореактивный двигатель	20 – 30
Газотурбинная установка (стационарная)	25 – 29
Двигатель карбюраторный	25 – 34
Дизель автомобильный	28 – 37
Дизель судовой	34 – 77
Электродвигатель	До 92

20. От чего так? От чего покорив околоземное пространство, и освоив совершенно новые принципы коммуникации, человечество затормозилось в своём развитии в области совершенствования источников энергии? Большинство учёных объясняет такой парадокс адаптационными свойствами человеческого сознания на уровне отдельного индивидуума и сообществ. Такую точку зрения оправдывают известные исторические факты, когда человеческие интеллектуальные усилия направлялись именно в те области науки и технологий, которые были наиболее необходимы для ускорения эволюционного процесса.

21. В случае с источниками энергии, человечество было попросту избаловано изобилием углеводородов, добывать которые на протяжении последней сотни лет не составляло большого труда и не стоило значительных денег. Вершиной энергетической пирамиды по вполне понятным причинам стала нефть.

22. Нефть представляет собой много фракционное соединение, в котором доминируют углерод (83 – 87%) и водород (11 – 14%), т.е. элементы, которые соединяются друг с другом в различных пропорциях. Одна из возможных формул нефти:  $C_nH_m$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_6H_6$ ,  $C_8H_{10}$ , другими словами  $C_xH_y$ .

23. Углеводороды содержатся в земной коре в составе нефти, каменного и бурого углей, природного и попутного газов, сланцев и торфа. Несмотря на то, что запасы этих полезных ископаемых на Земле не безграничны до настоящего времени они расходуются главным образом в качестве топлива (двигатели внутреннего сгорания, тепловые электростанции, котельные) и лишь незначительная часть используется как сырьё в химической промышленности. До 85% всей добываемой нефти идет на получение горюче-смазочных материалов и лишь около 15% применяется в виде химического сырья.

24. На рис. 117.5 схематически изображены рабочие циклы распространённых типов силовых установок, которыми оборудуются автомобили, суда и паровозы. Автомобильные бензиновые двигатели работают, используя цикл Отто, дизельные автомобильные, тракторные и судовые двигатели – цикл Рудольфа Дизеля, паровозы – цикл паровой машины. Общим для всех циклов является адиабатическое расширение рабочего тела. В двигателях внутреннего сгорания (с принудительным воспламенением горючей смеси) вспышка происходит в течение малого промежутка времени, объём поршневого пространства, практически, не изменяется, т.е. начальная стадия кругового процесса протекает при постоянном объёме. В дизельном двигателе топливо впрыскивается постепенно, и горение смеси протекает при постоянном давлении. В паровой машине при постоянном давлении подаётся пар. Все приведенные выше процессы называются квазистатическими (почти статическими, т.е. почти равновесными).

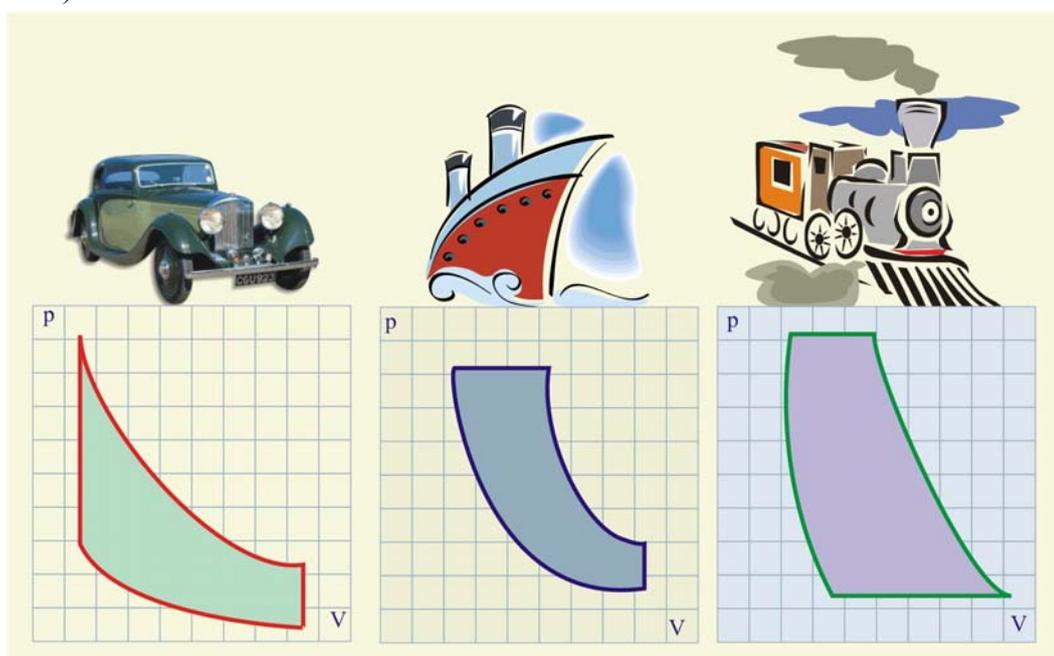


Рис. 117.5. Рабочие циклы наиболее распространённых двигателей

118. Идеальный одноатомный газ переходит из состояния 1 в состояние 2 при неизменной массе. Как ведут себя величины давления, объёма и внутренней энергии, описывающие этот газ в ходе указанного процесса:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится?

### Решение

1. Если прямую 1–2 продолжить, то продолжение пересечёт общую точку координат (рис. 114.2), что позволяет утверждать, что протекает изохорный процесс ( $V = \text{const}$ ).

2. Давление газа в процессе уменьшается.

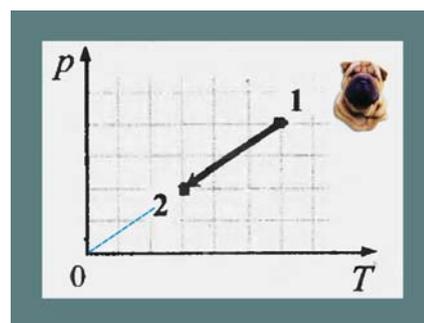


Рис. 118. Изменение состояния

### 3. Внутренняя энергия газа

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

при уменьшении температуры, будет так же уменьшаться.

Давление газа	Объём газа	Внутренняя энергия
2	3	2

119. В тепловой машине температура нагревателя  $T_H = 600$  К, температура холодильника на  $\Delta T = 200$  К меньше, чем у нагревателя. Чему равен максимальный КПД?

#### Решение

1. В соответствии с теоремой Карно

$$\eta = 1 - \frac{T_H - \Delta T}{T_H} \cong 0,33 \left( \frac{1}{3} \right);$$

120. Идеальный тепловой двигатель имеет определённый КПД. Рассматривается два типа изменений, вносимых в работу машины. Один раз температура нагревателя поднимается на величину  $\Delta T$  при неизменной температуре холодильника. Во второй раз температуру холодильника понижают на величину  $\Delta T$ , оставляя температуру нагревателя прежней. В каком случае КПД тепловой машины будет выше?

#### Решение

1. Запишем уравнения КПД для двух вариантов тепловой машины и сравним их

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= 1 - \frac{T_X}{T_H + \Delta T}; \\ \eta_2 &= 1 - \frac{T_X - \Delta T}{T_H}; \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \eta_1 &= \frac{T_H + \Delta T - T_X}{T_H + \Delta T}; \\ \eta_2 &= \frac{T_H - T_X + \Delta T}{T_H}; \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{(T_H - T_X + \Delta T)(T_H + \Delta T)}{(T_H + \Delta T - T_X)T_H} = \frac{T_H + \Delta T}{T_H}; \Rightarrow \eta_2 > \eta_1;$$

121. Как различаются по величине КПД термодинамических циклов 1-2-3-4-1 и 1-2-3-1?

#### Решение

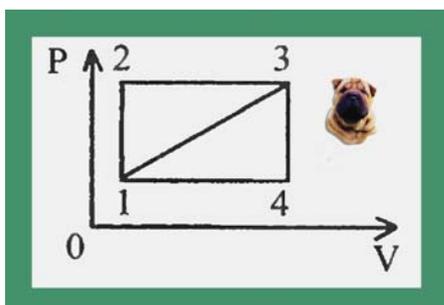


Рис. 121. Термодинамические циклы

1. Величина КПД цикла определяется отношением совершаемой работы к количеству получаемой тепловой энергии. Величина получаемой за циклы тепловой энергии одинакова, а работа численно равна площади фигуры, образованной графиками изопроцессов, составляющих данный цикл, поэтому:

$$\eta_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1} = 2\eta_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1};$$

122. Как изменится давление идеального газа, если среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул газа уменьшить в два раза и концентрацию молекул тоже уменьшить в два раза?

### Решение

1. В соответствии с основным уравнение МКТ

$$p = nk_B T;$$

2. Средняя кинетическая энергия молекулы связана с температурой следующей зависимостью

$$\frac{m_0 \langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} k_B T;$$

3. Уменьшение в два раза концентрации молекул и кинетической энергии вдвое, приведёт к уменьшению давления в четыре раза.

---

123. Точка росы для водяного пара в комнате равна  $t_1 = 6^\circ\text{C}$ . В комнату внесли с балкона бутылку с водой, которая вскоре покрылась мелкими капельками воды. Из этого следует, что:

- 1) температура воздуха на балконе ниже  $6^\circ\text{C}$ ;
- 2) влажность воздуха на балконе больше, чем в комнате;
- 3) влажность воздуха в комнате меньше, чем на балконе;
- 4) температура воздуха на балконе выше  $6^\circ\text{C}$ ,

### Решение

1. Точка росы – температура, при которой содержащийся в воздухе водяной пар становится ненасыщенным. При увеличении температуры плотность паров возрастает

$$\rho_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}} \mu}{RT};$$

2. Давление насыщенных паров зависит от температуры

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

где  $p_0$ ,  $T_0$  – известное значение давления насыщенных паров при температуре  $T_0$ ,  $\mu$  – молярная масса пара,  $r$  – удельная теплота парообразования.

3. Из уравнений следует, что на балконе, при более низкой, чем в комнате температуре, пары воды были насыщенными, при внесении бутылки в комнату с более высокой температурой, пары стали резко не насыщенными и пошёл процесс конденсации.

---

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ПРИБОР ДЛЯ ЕЁ ИЗМЕРЕНИЯ
А) сила	1) калориметр
Б) относительная влажность воздуха	2) манометр
	3) психрометр
	4) динамометр

Рис. 124. Соответствие приборов и величин

124. Установить соответствие между физическими величинами и приборами для измерения этих величин.

### Решение

1. Силу измеряют динамометрами. Когда-то еди-

ницей измерения силы была дина, отсюда и название – динамометр.

2. Относительная влажность измеряется гигрометрами, основанными на психометрической методике.

А	Б
4	3

125. Повышение влажности приводит к нарушению теплового обмена человека с окружающей средой. Это связано с тем, что при этом изменяется:

- 1) удельная теплоёмкость воздуха;
- 2) скорость испарения влаги с поверхности тела;
- 3) атмосферное давление;
- 4) содержание кислорода в воздухе?

### Решение

1. Нарушение теплообмена между телом и окружающей средой связано с уменьшением скорости испарения, т.е. скорости превращения жидкости в пар. Эта скорость зависит, прежде всего, от состояния окружающей среды и температуры тела. Если водяной пар в воздухе является ненасыщенным, при малой влажности, то испарение протекает более интенсивно. Увеличение влажности приводит к уменьшению скорости испарения, уменьшению интенсивности теплообмена.

126. Привести в соответствие явление, происходящее на границе воздух – вещество в другом агрегатном состоянии с прибором для измерения влажности, в котором это явление лежит в основе измерения данной физической величины.

ЯВЛЕНИЕ	НАЗВАНИЕ ПРИБОРА
А) Выпадение росы на металлическом корпусе при охлаждении корпуса	1) Психрометр
Б) Охлаждение жидкости при ее испарении	2) Волосяной гигрометр
В) Изменение длины белковых волокон при увеличении концентрации воды на их поверхности	3) Конденсационный гигрометр



Рис. 126.1. Соответствие явлений и измерительных приборов

### Решение

1. **Психрометр.** Скорость испарения влаги увеличивается по мере уменьшения относительной влажности воздуха. Испарение влаги, в свою очередь вызывает охлаждение объекта, с которого влага испаряется. По мере охлаждения влажного объекта уменьшается и скорость испарения влаги до тех пор пока при некоторой температуре не будет достигнуто динамическое равновесие – количество испарившейся влаги сравняется с количеством конденсирующейся. Таким образом, температура влажного объекта (например, термометра, обёрнутого во влажную ткань) даёт информацию об относительной влажности воздуха. (<http://ru.wikipedia.org/wiki>)

2. **Гигрометр.** Действие волосяного гигрометра (от греческого слова *hygros* – влажный) основано на том, что обезжиренный человеческий волос в условиях большой влажности удлиняется, а при низкой влажности сокращается

3. **Конденсационный гигрометр.** Прибор для определения-влажности воздуха путем охлаждения последнего до точки росы. В ряде конструкций металлический сосуд, наполненный эфиром, охлаждают (вызывая продуванием воздуха усиленное испарение эфира) и следят за появлением на отполированной стенке капель воды. По термометру, вставленному внутрь сосуда, отмечают температуру, при которой это происходит. Эта температура является точкой росы при данном содержании водяного пара в воздухе. По точке росы находят соответствующую ей упругость пара. (<http://ru.wikipedia.org/wiki>)

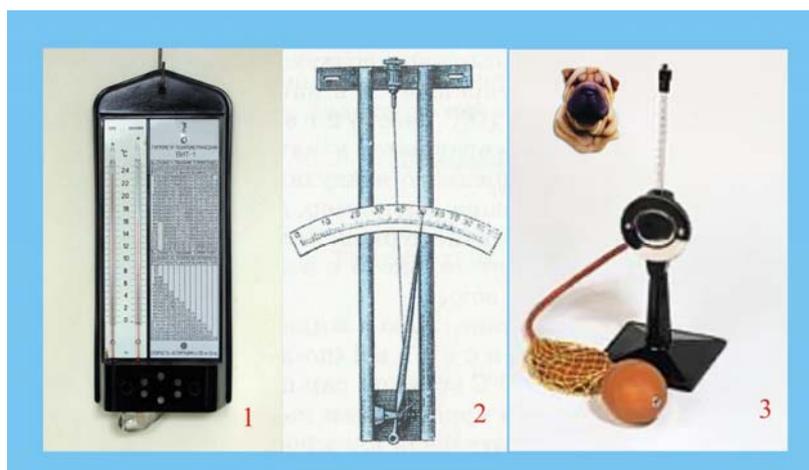


Рис. 126.2. Приборы для измерения влажности

А	Б	В
3	1	2

127. В кубическом метре воздуха в помещении при температуре  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  находится  $m_{\text{п}} = 1,12 \cdot 10^{-2}$  кг водяного пара. Пользуясь таблицей плотности насыщенных паров воды, определить относительную влажность воздуха.

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	16	17	18	20	21	22	23	24	25
$\rho \cdot 10^{-2}$ кг/м <sup>3</sup>	1,36	1,45	1,54	1,63	1,73	1,83	1,95	2,18	2,3

### Решение

1. Плотность пара в комнате составляет  $\rho_1 = 1,12 \cdot 10^{-2}$  кг/ м<sup>3</sup>.
2. Относительная влажность

$$\varphi_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{нп}}} \cong 0,65 \text{ (65\%);}$$

128. На фотографии представлены два термометра, входящих в состав психрометра. Определить в процентах по психометрической таблице влажность воздуха в помещении, где производятся измерения



Рис. 128. Гигрометр и психометрическая таблица

129. Один моль разреженного газа сначала изотермически сжимали, а затем изохорно нагревали. На каком из рисунков изображён график этих процессов?

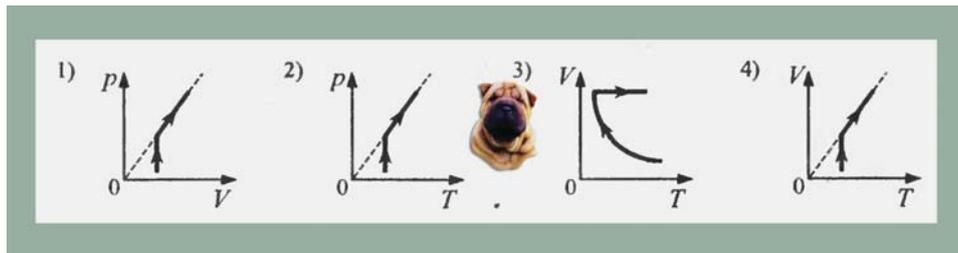


Рис. 129. Графики процессов

### Решение

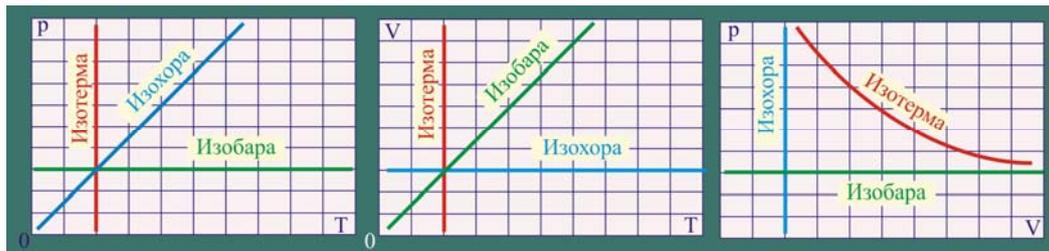


Рис. 129.2. Графики изопроцессов в различных координатах

1. Изотермическое сжатие предусматривает уменьшение объёма и увеличение давления. Под эти требования подходит только график 2, потому что график 3 демонстрирует изотермическое расширение, а графики 1 на второй стадии процесса описывается изобарой (рис. 129.2), график 4 на второй стадии тоже осуществляется по изобарной схеме.

130. Температура нагревателя идеального теплового двигателя Карно  $t_H = 227^\circ\text{C}$ , а температура холодильника  $t_X = 27^\circ\text{C}$ . Рабочее тело двигателя за цикл совершает работу  $A = 10\text{ кДж}$ . Какое количество теплоты получает рабочее тело от нагревателя за цикл?

### Решение

1. Определим КПД цикла

$$\eta = 1 - \frac{T_X}{T_H} = 1 - \frac{300}{500} = 0,4;$$

2. Определим далее полученное количество тепла

$$Q = \frac{A}{\eta} = 25 \text{ кДж};$$

131. Температуру холодильника тепловой машины увеличили, оставив температуру нагревателя прежней. Количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл, не изменилось. Как при этом изменились: КПД тепловой машины; количество теплоты отданной газом холодильнику; работа за цикл.

Для каждой величины определить соответствующий характер изменения:

- 1) увеличилась;
- 2) уменьшилась;
- 3) не изменилась?

### Решение

1. Увеличение температуры холодильника приведёт к уменьшению КПД тепловой машины

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_X}{T_H}; \quad \eta_2 = 1 - \frac{T_X + \Delta T}{T_H};$$

2.

$$\eta_1 = \frac{T_H - T_X}{T_H}; \quad \eta_1 = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}; \quad Q_H = \text{const};$$

$$\eta_1 > \eta_2; \Rightarrow Q_{X(2)} > Q_{X(1)};$$

КПД тепловой машины	Количество теплоты, отданное газом холодильнику за цикл работы	Работа газа за цикл
2	1	2

## 6. Электростатика

132. Когда снимается одежда, то временами слышится треск, особенно, когда одежда изготовлена из синтетических тканей. Какое явление объясняет этот треск?

- 1) электризация;
- 2) трение;
- 3) нагревание;
- 4) электромагнитная индукция.

### Решение

**Электризация** представляет собой процесс, в результате которого тела приобретают способность участвовать в электромагнитных взаимодействиях, т.е. приобретает электрический заряд.

Электризация тел – процесс перераспределения электрических зарядов, входящих в состав тела. При электризации не происходит возникновения новых зарядов, а имеет место их перераспределение между телами или разными частями одного и того же тела. При этом, безусловно, справедлив закон сохранения заряда.

### Виды электризации тел

- **Электризация за счёт электропроводности** происходит при контакте двух проводников с различными зарядами. Так, например, при контакте заряженного и нейтрального тела происходит частичное перераспределение свободных электронов между телами. Если заряженное тело несло отрицательный заряд, то электроны частично мигрируют на незаряженное тело, если заряженное тело имело первоначально положительный заряд, то на него перейдёт часть электронов с незаряженного тела;
  - **Электризация трением** возникает при механическом контакте перемещающихся друг относительно друга нейтральных тел, когда электроны одного тела переходят на другое. В результате электризации трением тела получают одинаковые по модулю и противоположные по знаку электрические заряды. Электризация трением является причиной возникновения, так называемого, «статического электричества», разряды которого наблюдаются при расчёсывании в темноте сухих волос.
  - **Электризация через влияние** происходит за счёт индуцирования (наведения) электрического заряда полем. Если к нейтральному проводнику поднести заряженное тело (без прямого контакта) то свободные заряды нейтрального проводника придут под действием поля в движение и в одном конце тела появится избыток электронов, а в другом их недостаток. Разрезав в целом электрически нейтральное тело, можно получить два разноимённо заряженных тела.
-

133. При трении пластмассовой линейки о шерсть линейка заряжается отрицательно. Это объясняется тем, что:

- 1) электроны переходят с линейки на шерсть;
- 2) протоны переходят с линейки на шерсть;
- 3) Электроны переходят с шерсти на линейку;
- 4) протоны переходят с шерсти на линейку.

### Решение

1. Протоны являются составной частью атомного ядра и удерживаются в нём ядерными силами. При механических и химических воздействиях извлечь протоны из ядра не представляется возможным

2. Поскольку по условию задачи линейка оказывается заряженной отрицательно, то на ней имеется избыток некомпенсированных электронов, следовательно, электроны переходят с шерсти на линейку.

3. Основной причиной явления, «электризация трением», является то, что при тесном соприкосновении двух различных тел часть электронов переходит с одного тела на другое. В результате этого на поверхности первого тела (шерсти) оказывается положительный заряд (недостаток электронов), а на поверхности второго тела (линейки) – отрицательный заряд (избыток электронов).

4. Говоря о «тесном соприкосновении» двух тел, имеется ввиду такое сближение их, при котором расстояние между частицами разных тел становится примерно таким же, как расстояние между атомами или молекулами одного и того же тела. Только при этих условиях возможен «захват» одним телом электронов другого тела и возникновение двойного электрического слоя. Но тела, строго говоря, никогда не бывают идеально гладкими. Поэтому, даже тогда, когда прижимаются два тела вплотную друг к другу, действительно тесное соприкосновение их в указанном смысле слова имеет место не на всей поверхности тел, а только в отдельных небольших участках.

5. Когда тела трутся друг о друга, то увеличивается число таких участков тесного соприкосновения, в которых происходит электризация, и тем самым увеличивается общий заряд, который окажется на каждом из тел, когда их раздвинут. Только в этом и заключается роль трения. «Электризация трением» – это название, имеющее историческое происхождение и не более того.

134. Как изменится модуль и направление сил взаимодействия двух небольших металлических шариков одинакового диаметра, несущих заряды  $q_1 = +5$  нКл и  $q_2 = -3$  нКл, если шарики привести в соприкосновение, а затем раздвинуть на прежнее расстояние?

### Решение

1. Запишем уравнение силы Кулона для двух вариантов зарядов шариков, с учётом того, что после соприкосновения шарики станут иметь одинаковый заряд  $q_0 = (5 - 3) \text{ нКл} / 2 = +1$  нКл

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}; \\ F_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0^2}{r^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = 15;$$

2. Модуль силы взаимодействия уменьшится, а направление поменяется на обратное. Первоначально заряды были разноимённые, они притягивались, после соприкосновения оба заряда стали положительными, они будут отталкиваться.

135. Как направлена сила Кулона, действующая на положительный заряд  $+2q$ , помещённый в центр квадрата, в вершинах которого находятся заряды  $+q, +q, -q, -q$ ?

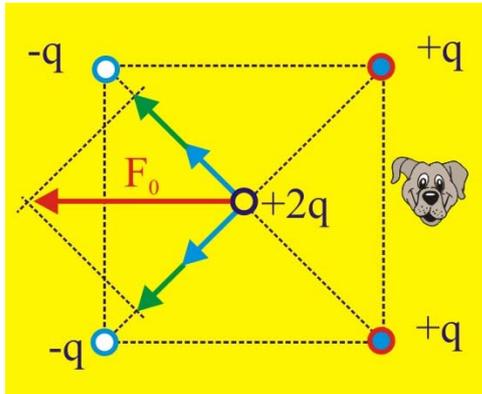


Рис. 135. Заряды в квадрате

### Решение

1. Между зарядами  $-q$  и  $+2q$  будут действовать силы притяжения, а между зарядами  $+q$  и  $+2q$  силы отталкивания, которые направлены в обоих случаях по линии, соединяющей центры зарядов.

2. Вначале необходимо сложить силы, направленные по одной линии, получатся две силы, равные по модулю и направленные перпендикулярно друг другу, затем по правилу параллелограмма их сложить, что даст результирующую силу  $F_0$ .

136. Два маленьких шарика, обладающих одинаковым по модулю зарядом  $q$  каждый, находятся на расстоянии  $r$  друг от друга и притягиваются силой  $F$ . Какова сила электрического притяжения двух других шариков, если заряд одного из них равен  $3q$ , заряд другого  $q/3$ , а расстояние между ними  $3r$ ?

### Решение

1. Составим систему уравнений на основании закона Кулона, приняв

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k,$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= k \frac{q \cdot q}{r^2}; \\ F_2 &= k \frac{3q \cdot \frac{q}{3}}{9r^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = 9; \quad F_2 = \frac{F_1}{9};$$

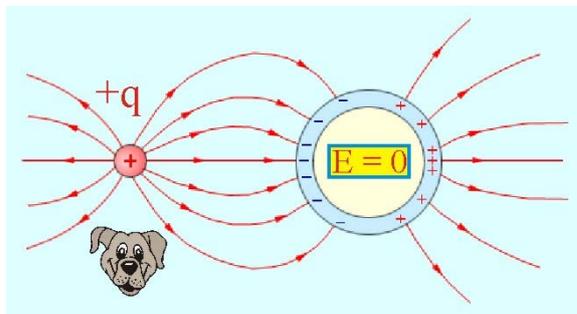


Рис. 137. Электростатический экран

137. Тело, обладающее электрическим зарядом, вследствие явления электростатической индукции притягивает незаряженное тело. Как изменится сила притяжения, если незаряженное тело окружить заземлённой металлической сферой?

### Решение

1. Металлическая сферическая оболочка, помещённая в электрическое поле, приобретёт индукционный заряд,

который сосредоточится на поверхности, причём заряд сферы возникнет вследствие разделения зарядов. Свободные электроны под действием внешнего поля переместятся в направлении противоположном направлению силовых линий, создавая на одной стороне оболочки отрицательный заряд, на противоположной стороне будет недостаток электронов, заряд будет положительным.

2. Внутри проводников, сферической оболочки, в частности, напряжённость электрического поля равна нулю, т.к. в противном случае в проводнике возникло бы движение зарядов, электрический ток.

3. Внешний заряд, таким образом, никак не будет действовать на тело внутри оболочки. Это называется электростатическим экранированием.

4. По условию задачи, ко всему прочему оболочку заземляют, т.е. все возникающие на её поверхности заряды будут стекать в земную твердь.

138. Задано расположение двух неподвижных точечных зарядов  $-q$  и  $+q$ . Определить правильное направление вектора напряжённости электрического поля этих зарядов в точке  $A$ .

### Решение

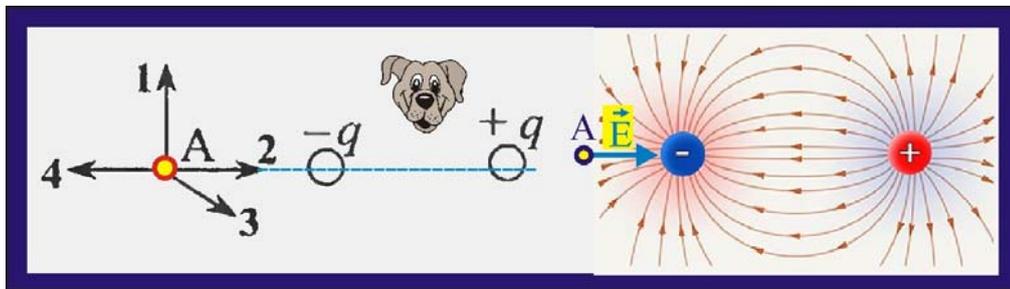


Рис. 138. Поле разноимённых электрических зарядов

1. Силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах, поэтому вектор напряжённости поля в точке  $A$ , лежащей на линии, соединяющей разноимённые заряды будет располагаться на этой линии и направлен в сторону отрицательного заряда.

139. Отрицательно заряженная пылинка, помещена в электрическое поле, напряжённость которого направлена горизонтально слева направо. Если пренебречь силой тяжести то, в каком направлении и как начнёт двигаться пылинка?

### Решение

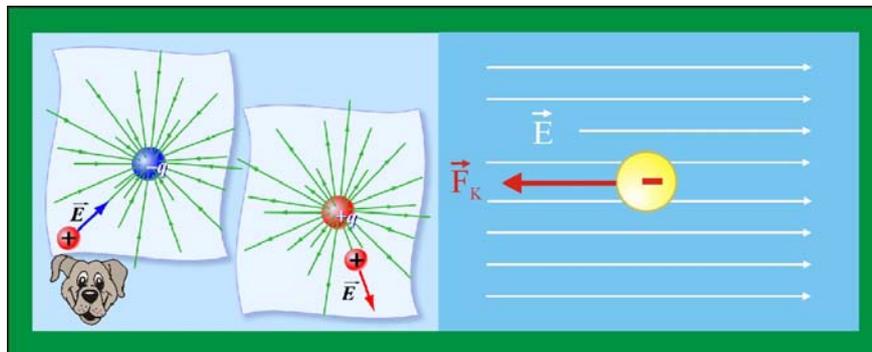


Рис. 139. Движение пылинки в электрическом поле

### Решение

1. На отрицательно заряженную пылинку, помещённую в электрическое поле, будет действовать сила Кулона

$$\vec{F}_k = -q\vec{E},$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряжённости электрического поля,  $-q$  – отрицательный заряд пылинки.

2. Если пылинка обладает массой  $m$ , то она под действием силы Кулона, в соответствии со вторым законом Ньютона приобретёт ускорение  $\vec{a}$

$$\vec{F}_k = m\vec{a},$$

т.е. начнёт двигаться с ускорением влево, в сторону, противоположную направлению силовых линий поля, потому что заряд отрицательный.

---

140. Как изменится модуль напряжённости электрического поля, создаваемого точечным зарядом, при уменьшении расстояния от него до точки наблюдения в  $n$  раз?

### Решение

1. Как только обнаружилось, что заряженные тела могут воздействовать на другие без непосредственного контакта, сразу возник законный вопрос. Как? Каков механизм передачи силового воздействия? Что является причиной возникновения механических сил? Ведь в своих опытах Кулон посредством крутильных весов регистрировал именно механический момент хорошо изученных Ньютоновских сил. Одновременно возникли две гипотезы.

2. В соответствии с гипотезой дальнего действия, телам приписывалось свойство действовать на другие тела на расстоянии, причём, предполагалось, что это действие передаётся мгновенно и без посредничества каких-либо третьих сред. Согласно этой гипотезе, заряженное тело никаких изменений в окружающем пространстве не производит.

3. Гипотеза ближнего действия предполагала наличие между телами некой субстанции порождаемой электрическими зарядами и обеспечивающей силовые воздействия на другие тела и заряды. Рассуждения сторонников теории ближнего действия строились на механических аналогиях. Уже достаточно полно были исследованы свойства упругих волн, для распространения которых непременно нужна была среда. Упругие волны тоже обладают энергией и могут воздействовать на тела, расположенные на значительном расстоянии от источника колебаний. Было логично, в этой связи, предположить, что электрическое действие передаётся с конечной скоростью и на конечные расстояния. Из таких рассуждений следовало, что всякое заряженное тело в отсутствие остальных должно изменять свойства окружающего его пространства.

4. Современная официальная наука исповедует только идею ближнего действия, в соответствии с которой вокруг электрических зарядов пространство заполнено особой субстанцией, неким физическим агентом, в котором проявляются механические силы, вызванные взаимодействием этого агента и вносимых в него тел или зарядов. Такая субстанция получила название – электрическое поле. Появление в некой точке пространства электрического заряда сопровождается возникновением электрического поля.

5. Движущиеся заряды генерируют электромагнитное поле, т.е. комбинацию электрической и магнитной составляющей. Как выяснилось при исследо-

вании электромагнитных полей, они заключают в себе и переносят энергию подобно упругим волнам. Электромагнитные поля, таким образом, представляют собой абстрактное понятие, предназначенное для объяснения электрических и магнитных взаимодействий. Электромагнитные поля, являющиеся объективной материальной реальностью, представляются в виде особой формы материи обладающей определённым набором физических свойств и характеристик.

6. Количественно электрическое поле заряда  $q$  можно охарактеризовать, внося в него другой пробный заряд  $q_0$  и измеряя силу взаимодействия  $F$  в разных точках пространства. Сила этого взаимодействия, следуя закону Кулона, будет пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$\vec{F} = k \frac{|q_1||q_0|}{r^3} \vec{r}. \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

7. Такая характеристика электрического поля не будет универсальной, потому, что сила Кулона в каждой точке пространства наряду с исходным зарядом будет зависеть от величины пробного заряда  $q_0$ . От такого неудобства можно избавиться, если в качестве характеристики поля рассматривать не величину силы, а отношение этой силы к пробному заряду

$$\frac{\vec{F}}{|q_0|} \equiv \vec{E} = k \frac{|q_1|}{r^3} \vec{r}.$$

8. Векторная величина  $\vec{E}$  называется напряжённостью электрического поля. Для изолированного точечного заряда, расположенного в вакууме или сухом воздухе, напряжённость электрического поля определяется непосредственно из уравнения закона Кулона

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^3} \vec{r}. \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2};$$

9. При уменьшении расстояния в  $n$  раз напряжённость электрического поля возрастёт в  $n^2$  раз.

10. Как следует из уравнения, если поле создано положительным зарядом (напомним, что это понятие условное, принятое по общему соглашению), то вектор напряжённости электрического поля направлен от заряда во внешнее пространство по радиус-вектору, соединяющему заряд и данную точку пространства (рис. 140). В случае отрицательного заряда вектор напряжённости так же направлен по радиус-вектору, но из данной точки в сторону заряда.

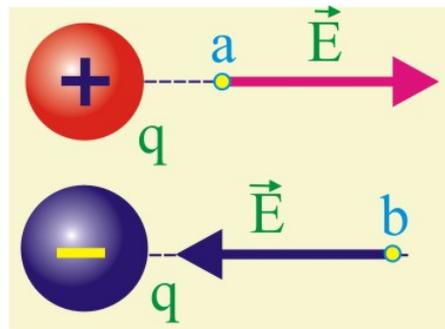


Рис. 140. Направление напряжённости электрического поля

11. Таким образом, если известна напряжённость электрического поля в какой-либо точке пространства, окружающего изолированный заряд, то можно однозначно определить величину и направление силы Кулона, которая возникнет при помещении в эту точку заряда  $q$ .

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

141. Плоский конденсатор подключён к источнику постоянного тока. Как изменится при увеличении зазора между пластинами три величины: ёмкость конденсатора, величина заряда на его обкладках и разность потенциалов между обкладками? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

### Решение

1. Электрическая ёмкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

очевидно, что при увеличении расстояния между пластинами  $d$ , ёмкость уменьшится.

2. Величина заряда на обкладках конденсатора

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}; \quad Q = CU;$$

Так как конденсатор подключён к источнику питания, то  $U = \text{const}$ , значит, при уменьшении ёмкости заряд должен уменьшаться.

Ёмкость конденсатора	Величина заряда на обкладках конденсатора	Разность потенциалов на обкладках конденсатора
2	2	3

142. Точка В находится в середине отрезка АС. Неподвижные точечные заряды  $-q$  и  $-2q$  расположены в точках А и С соответственно. Какой заряд надо поместить в точку С взамен заряда  $-2q$ , чтобы напряжённость поля в точке В увеличилась в два раза?

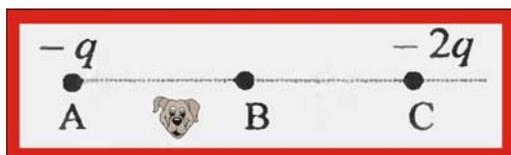


Рис. 142. Напряжённость поля

### Решение

1. В точке В векторы напряжённости от одноимённых зарядов будут направлены в противоположную сторону, поэтому, создаваемые зарядами напряжённости вычитаются.

2. Первоначальная напряжённость поля

$$E_1 = k \frac{2q}{r^2} - \frac{q}{r^2} = k \frac{2q - q}{r^2} = k \frac{q}{r^2};$$

3. Для того чтобы напряжённость поля увеличилась в два раза, с точку С надо поместить заряд  $-3q$ , тогда

$$E_2 = k \frac{3q - q}{r^2} = k \frac{2q}{r^2} = 2E_1;$$

143. Полому проводящему шару сообщается отрицательный заряд. В каких областях пространства I, II или III напряжённость электрического поля будет отличной от нуля? Область I расположена внутри полости, область II расположена внутри проводника, область III вне сферической оболочки снаружи.

### Решение

1. Заряженный проводник характеризуется тем, что все заряды располагаются на его поверхности, внутри проводника электрическое поле отсутствует. Свидетельством тому является отсутствие движения зарядов внутри проводника.

2. Внутри полости (рис.137) поле так же будет отсутствовать.

3. Заряженной оболочкой электрическое поле будет создаваться только во внешней области III, причём в каждой точке поверхности вектор напряжённости будет перпендикулярен ей, в данном случае будет иметь радиальное направление.

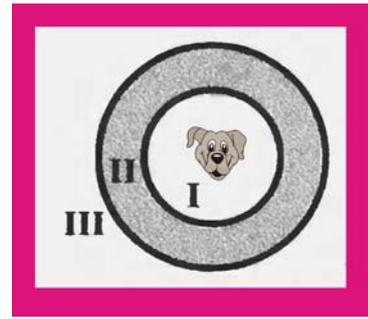


Рис. 143. Заряженная оболочка

144. Диэлектрическое тело внесено в электростатическое поле, а затем разделено на части А и В. Зарядами каких знаков будут обладать эти части после разделения?

### Решение

1. Для выяснения влияния на электрическое поле диэлектрика можно провести виртуальный опыт. Если электрометру (рис. 144.2) сообщить некоторый положительный заряд, то стрелка прибора отклонится, заняв положение 1. Приблизив к клемме электрометра незаряженное диэлектрическое тело, обнаружим, что заряд электрометра уменьшается, стрелка при этом займёт положение 2. Аналогичный эффект имел бы место, ещё в более выраженном виде, при замене диэлектрика проводником, причём, проводник при наличии электрического поля заряжается индуцировано, что даёт основание сделать предположение о появлении заряда и на диэлектрике. Другими словами часть первоначальной энергии поля «забирает» на себя диэлектрическое вещество. Логично далее предположить, что появление зарядов на диэлектрике должно приводить к возникновению сил взаимодействия с электрическим полем.

2. Если взять, подвешенный на нити стеклянный или парафиновый цилиндр и поднести к заряженному шару, то стержень ориентируется вдоль силовых линий поля, так что его ось окажется, в конечном счёте, направленной к центру шара (рис. 144.3). Такая ориентация свидетельствует о наличии на стержне электрических зарядов, причём на ближнем к шару торце будут сосредоточены отрицательные заряды, а на противоположном – положительные.

3. Ещё один наглядный эксперимент можно

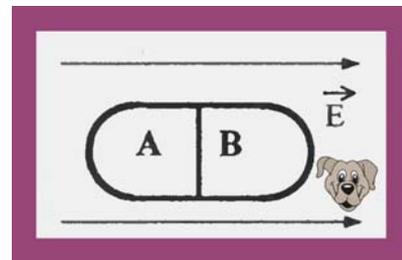


Рис. 144.1. Диэлектрик в поле

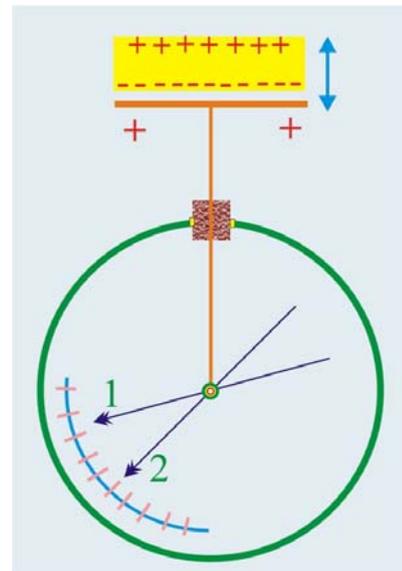


Рис. 144.2. Влияние диэлектрика на заряд электрометра

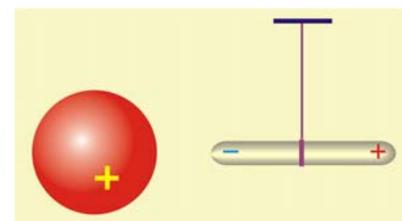


Рис. 144.3. Ориентация диэлектрика в поле

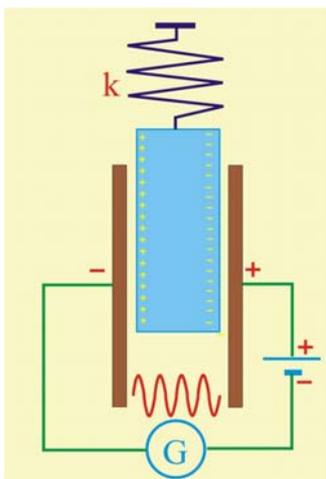


Рис. 144.3. Возникновение направленного движения зарядов при перемещении диэлектрика

провести с двумя параллельными вертикальными проводящими пластинами (рис. 144.4), образующими воздушный конденсатор. При включении такого устройства в цепь, состоящую из высоковольтной батареи и чувствительного гальванометра, последний естественно протекание через него заряда не обнаружит, потому что воздушный промежуток ток не проводит. Введём в пространство между электродами стеклянную пластинку, подвешенную на пружине, и приведём её в возвратно поступательное движение, чтобы она периодически проникала в пространство между обкладками конденсатора. При колебаниях пластины стрелка гальванометра тоже станет колебаться, что указывает на перемещение зарядов в цепи, это свидетельствует о появлении электрических зарядов в пластине, которые, взаимодействуя с зарядами обкладок, вызывают описываемый эффект

4. Явление появления зарядов на непроводящих веществах называется поляризацией диэлектриков, а сами заряды именуют поляризационными. Явление поляризации диэлектриков по сути своей похоже на индукцию зарядов в проводниках, однако имеется ряд принципиальных отличий.

5. Если заряженный проводник разделить на две части, то эти части будут нести разноимённые заряды. Отделить же поляризационные заряды не представляется возможным. Проводящие материалы, будучи заряженные полем, сохраняют некоторое время заряд после исчезновения поля. В диэлектриках после исчезновения поля признаки заряженности исчезают. Дело в том, что в проводниках имеются подвижные носители заряда, которые достаточно свободно могут перемещаться в пределах образца, в электрическом поле разноимённые заряды концентрируются на противоположных концах образца.

6. При разъединении образца они там остаются даже при «выключении» внешнего поля. В диэлектриках возникающие заряды перемещаться не могут, они связаны с фиксированными объёмами образца. В присутствии внешнего поля заряды в диэлектриках возникают в пределах отдельных молекул. При помещении диэлектрика в электрическое поле заряды в каждой молекуле смещаются в противоположные стороны. На одном конце молекулы появляется, таким образом, положительный заряд, а на противоположном – отрицательный. Молекула при этом превращается в диполь. Смещение зарядов в молекулах обнаруживается в виде заряженности всего образца. Поляризация диэлектриков приводит к появлению на поверхностях тонкого слоя нескомпенсированных зарядов противоположного знака.

7. Если диэлектрик неполярный, то он останется в электрическом поле нейтральным, никаких зарядов образовываться не будет.

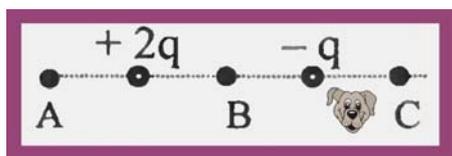


Рис. 145.1. Система зарядов

145. Дано расположение двух неподвижных точечных зарядов  $+2q$  и  $q$ . В какой из точек – А, В или С модуль напряжённости суммарного электрического поля этой системы зарядов будет минимален?

## Решение

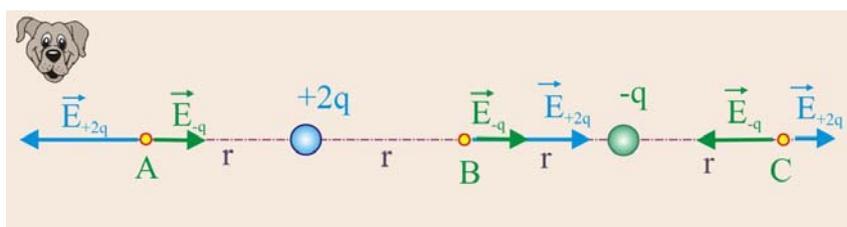


Рис. 145.2. Напряжённость поля, создаваемого системой зарядов

1. Если принять расстояние между точками и зарядами за  $r$ , то результирующая напряжённость в них определится как

$$E_A = k \frac{2q}{r^2} - k \frac{q}{(3r)^2}; \quad E_B = k \frac{2q}{r^2} + k \frac{q}{r^2}; \quad E_C = k \frac{q}{r^2} = k \frac{2q}{(3r)^2},$$

минимальная напряжённость будет иметь место в точке С.

146. Частица летит из точки А в точку В между обкладками заряженного конденсатора по траекториям указанным на рис. 146. В каком случае изменение кинетической энергии будет максимально?

## Решение

1. Рассмотрим неподвижный точечный заряд  $Q$ , расположенный в воздухе и создающий в окрестном пространстве электрическое поле напряжённостью

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

2. В поле перемещается пробный заряд  $q$  из начального положения 1 в конечное положение 2 вдоль произвольной криволинейной траектории, например I (рис. 146.2). Модуль силы Кулона, возникающей при взаимодействии зарядов, запишется следующим образом

$$F_k = Eq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}.$$

3. Найдём далее работу, совершаемую силой Кулона на элементарном перемещении заряда  $d\vec{r}$

$$\delta A = \vec{F}_k d\vec{r}.$$

4. Как видно из уравнения элементарная работа при перемещении точечного заряда в электрическом поле представляется скалярным произведением двух векторных величин, т.е. величина и знак работы зависит от взаимного направления  $\vec{F}_k$  и  $d\vec{r}$ . Работа на конечном перемещении определится в виде интеграла

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{qQ\vec{r}}{r^3} d\vec{r} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$

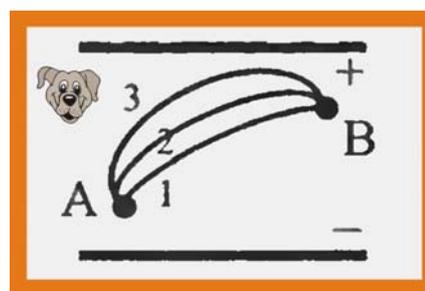


Рис. 146.1. Полёт частицы в поле

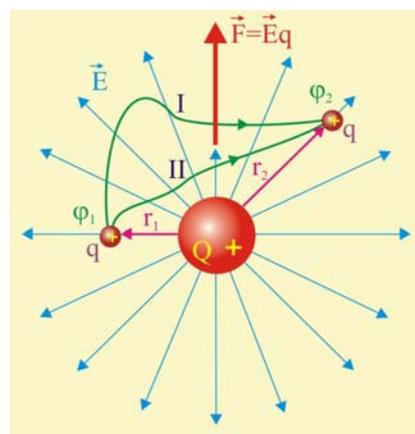


Рис. 146.2. Работа поля при перемещении заряда

5. Интеграл работы в общем случае зависит от положения начальной и конечной точек, а так же от формы траектории, по которой перемещается заряд  $q$ . **Однако для электрических полей неподвижных зарядов работа не зависит от формы траектории.** В этом легко убедиться, если из конечной точки 2 вернуть заряд в точку 1 по траектории, отличной от первоначальной. При перемещении заряда по любой замкнутой траектории, когда  $\vec{r}_1 = \vec{r}_2$  итоговая работа будет равна нулю, т.е. алгебраическая сумма работ, совершённых электрическими силами на замкнутом пути будет равна нулю

$$A_{1 \rightarrow 2} + A_{2 \rightarrow 1} = A_{1 \rightarrow 2} - A_{2 \rightarrow 1}.$$

Уравнение даёт основание выражение для работы переписать так

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

6. Электрическое поле неподвижных зарядов, таким образом, как и гравитационное поле, обладает свойством потенциальности, т.е. работа, производимая такими полями, не зависит от вида траектории, а определяется только положениями начальной и конечной точек перемещения.

7. Свойство потенциальности обусловлено тем обстоятельством, что в электростатических полях проявляются консервативные силы, дающие возможность каждую точку поля охарактеризовать с энергетических позиций. Действительно, совершаемая работа должна соответствовать определённому изменению энергии перемещаемого заряда. Подобное наблюдается в механике и определяется теоремой об изменении кинетической энергии

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = K_2 - K_1.$$

8. Поскольку в рассматриваемом в задаче работа по перемещению заряда из точки А в точку В будет одинаковой при любом виде траектории, то и изменение кинетической энергии заряда тоже будет одинаковым.

---

147. Воздушный конденсатор подсоединён к источнику напряжения  $U = 24$  В. Определить напряжённость электрического поля между обкладками конденсатора, расположенными на расстоянии  $d = 2$  см друг от друга.

### Решение

1. Напряжённость поля между обкладками плоского воздушного конденсатора

$$E = \frac{U}{d} = \frac{24}{2 \cdot 10^{-2}} = 1,2 \cdot 10^3 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$


---

148. Потенциал в точке А электрического поля равен  $\varphi_A = 200$  В. Какую работу совершают силы электрического поля при перемещении положительного заряда  $q = 5$  мКл в точку В с потенциалом  $\varphi_B = 100$  В?

### Решение

1. Работа по перемещению положительного заряда в электрическом поле

$$A_{1 \rightarrow 2} = q(\varphi_A - \varphi_B) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,5 \text{ Дж};$$


---

149. Электростатические весы представляют собой устройство, в котором действие силы тяжести компенсируется силой притяжения между заряженными пластинами, расположенными на расстоянии  $d = 1$  мм. Какой добавочный груз нужно поместить на чашку весов, чтобы расстояние между пластинами сохранилось при зарядке конденсатора напряжением  $U = 1$  кВ? Площадь пластин составляет  $s = 5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>.

**Решение**

1. Определим силу Кулона, действующую на положительно заряженную пластину

$$F = qE = \frac{q^2}{2\epsilon_0 s}$$

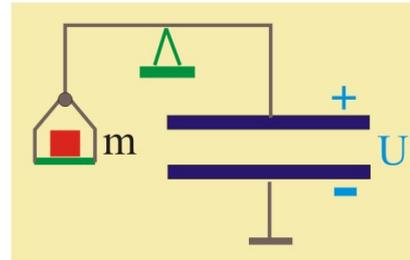


Рис.1.149. Емкостные весы

2. С другой стороны, заряд конденсатора можно выразить через его ёмкость и разность потенциалов между обкладками

$$q = CU = U \frac{\epsilon_0 s}{d}$$

3. Подставим в уравнение силы значение заряда

$$F = \frac{1}{2\epsilon_0 s} \frac{U^2 \epsilon_0^2 s^2}{d^2} = \frac{\epsilon_0 s U^2}{2d^2} \cong \frac{9 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 10^{-6}} \cong 2 \cdot 10^{-2} \text{ Н.}$$

4. Определим массу перегрузка  $m$  для уравновешивания весов

$$F = mg, \Rightarrow m = F/g \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

150. В однородном электрическом поле напряжённостью  $E = 2 \cdot 10^3$  В/м начала движение заряженная частица с зарядом  $q = 10^{-5}$  Кл и массой  $m = 10^{-3}$  кг. Какую скорость приобретёт частица при прохождении расстояния  $r = 0,1$  м?

**Решение**

1. Работа, производимая силами электрического поля, будет, в соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии равна:

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}; \quad \frac{mv_1^2}{2} = 0;$$

2. Работа производится силой Кулона на заданном перемещении  $r$

$$F_k r = \frac{mv^2}{2}; \quad qEr = \frac{mv^2}{2}; \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2qEr}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,1}{10^{-3}}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

151. Конденсатор подключен к источнику постоянного тока. Как изменится энергия электрического поля внутри конденсатора, если увеличить в два раза расстояние между пластинами?

**Решение**

1. Энергия электрического поля, запасаемая в плоском конденсаторе

$$W_E = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2};$$

2. Ёмкость плоского воздушного конденсатора определяется как:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}; \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{2d}; \quad C_2 = \frac{C_1}{2};$$

3. При уменьшении ёмкости конденсатора, запасаемая в нём энергия тоже уменьшится в два раза.

152. Два стеклянных кубика сблизили вплотную и поместили в электрическое поле, напряжённость которого направлена горизонтально влево. Затем кубики раздвинули и уже, потом убрали электрическое поле. Какое утверждение о зарядах на них верное:

- 1) заряды первого и второго кубиков отрицательны;
- 2) заряды первого и второго кубиков равны нулю;
- 3) заряды первого и второго кубиков положительны;
- 4) заряд первого кубика положителен, заряд второго кубика отрицателен.

лен.

### Решение

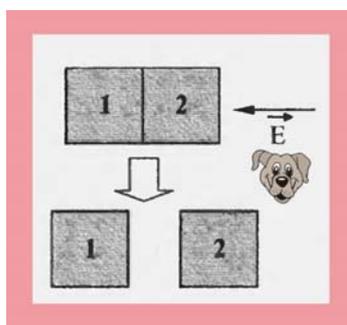


Рис. 152.1. Стеклянные кубики

1. Пренебрегая явлением поляризации стекла, можно утверждать, что заряды в стекле при совместном и разъединённом положении кубиков во внешнем электрическом поле возникать не будут, потому что в стекле отсутствуют свободные носители заряда, электроны или ионы. В этом случае верным является утверждение 2.

2. Однако при более строгом теоретическом рассмотрении в массе стекла может возникнуть внутренне поле обусловленное поляризацией молекул. в этом случае верным является утверждение 4.

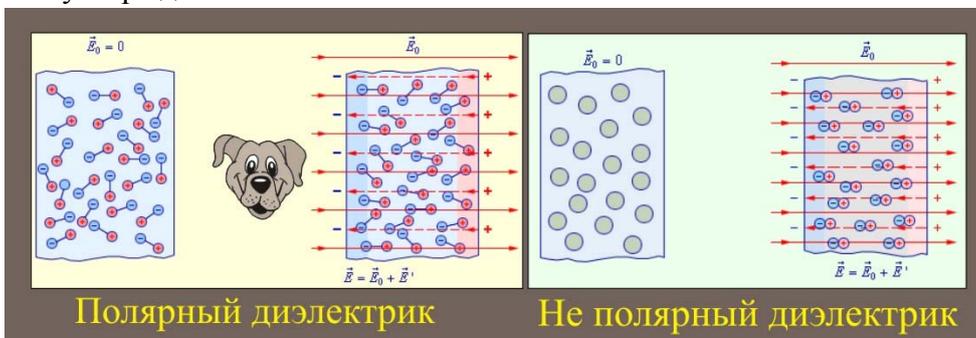


Рис. 152.2. Виды поляризации диэлектриков

153. Если заряд на конденсаторе постоянной ёмкости увеличить в два раза, то как изменится энергия электрического поля, запасённого между обкладками?

### Решение

1. Энергия электрического поля, запасаемая в плоском конденсаторе

$$W_E = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

при увеличении заряда в два раза, энергия поля тоже увеличится в два раза.

154. На пластинах плоского конденсатора равномерно распределён электрический заряд плотностью  $\sigma = 0,2 \text{ мкКл/м}^2$ . Расстояние между пластинами  $d = 1 \text{ мм}$ . На сколько изменится разность потенциалов на обкладках конденсатора, если расстояние между пластинами увеличить в три раза.

**Решение**

1. Разность потенциалов на обкладках конденсатора и его заряд связаны следующим соотношением:

$$C = \frac{Q}{U}, \Rightarrow U = \frac{Q}{C}.$$

2. При увеличении расстояния между обкладками изменяется ёмкость конденсатора и разность потенциалов между обкладками, другими словами

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_1 = \frac{\sigma s}{\epsilon_0 s} d_1, \quad U_2 = \frac{\sigma s}{\epsilon_0 s} d_2.$$

3. Определим разность потенциалов при изменении расстояния между обкладками

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} (d_2 - d_1) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} (3d_1 - d_1) \cong \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-12}} \cong 44,4 \text{ В}.$$

155. К незаряженному конденсатору ёмкостью  $C$  подключили параллельно заряженный до заряда  $q$  конденсатор такой же ёмкости. В каком отношении будет электрическая энергия батареи и исходного конденсатора?

**Решение**

1. Первоначальная энергия заряженного конденсатора при параллельном соединении распределится между двумя одинаковыми конденсаторами. Общая ёмкости которых будет равна сумме ёмкостей  $C_0 = C_1 + C_2$

$$W_1 = \frac{q^2}{2C}; \quad W_2 = \frac{q^2}{4C}; \quad \Rightarrow \quad W_1 = 2W_2;$$

156. Определить суммарную ёмкость батареи конденсаторов.

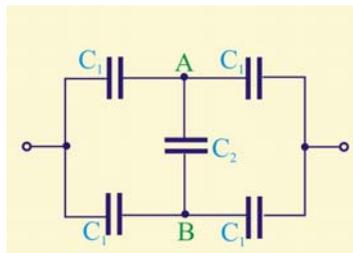


Рис. 156. Батарея конденсаторов

**Решение**

1. Ввиду симметрии схемы потенциалы точек  $A$  и  $B$  будут одинаковыми  $\varphi_A = \varphi_B$ , т.е.  $U_{AB} = 0$ , при включении батареи конденсаторов в цепь конденсатор  $C_2$  заряжаться не будет, поэтому его на полном основании можно из схемы исключить.

2. Батарея, таким образом, представляет собой две параллельные цепи, каждая из которых содержит две одинаковые последовательные ёмкости

$$C_{\Sigma} = \frac{C_1}{2} + \frac{C_1}{2} = C_1;$$

## 7. Постоянный ток

157. Если скорость направленного дрейфа электронов в электрической цепи увеличить в 2 раза, то что станет с силой тока в этой цепи?

### Решение

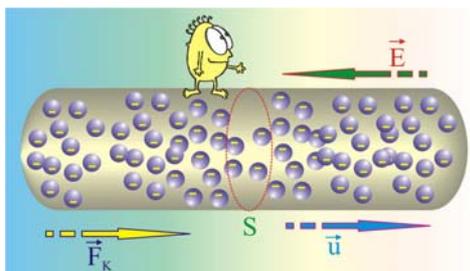


Рис. 157.1. Направленное движение носителей электрического заряда

1. Проводники являются таковыми по причине наличия в них большого числа носителей заряда, способных относительно легко перемещаться в пределах рассматриваемого образца. Металлы, как правило, являются хорошими проводниками тепла и электрического тока именно благодаря свободным электронам. Если металлический проводник (рис. 157) поместить в однородное электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}$ , то на каждый свободный электрон ( $e \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$  кг), в классическом представлении, будет действовать элементарная сила Кулона. Как и всякий материальный объект, электрон начнёт двигаться в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля (элементарный заряд электрона принято считать отрицательным).

2. Если бы в распоряжении исследователей был маленький человек, то он бы обнаружил, что через сечение проводника  $S$ , за которым он приставлен наблюдать, в одном направлении движутся электроны, что собственно и означает возникновение электрического тока. Направлением тока условимся считать направление движения положительных зарядов. Таким образом, электрический ток есть направленное движение носителей зарядов. В металлах направление тока принимается противоположным движению электронов проводимости..

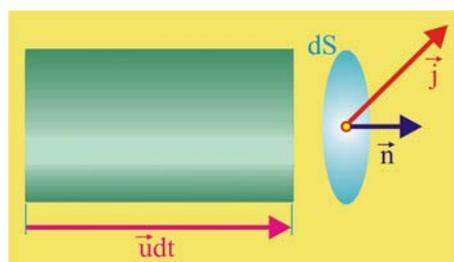


Рис. 157.2. Элементарный объём проводника

3. Выделим в проводнике физически малый объём (рис. 157.2) внутри которого направленно движутся со средней скоростью  $\vec{u}$  носители заряда. В металлах электроны, будучи свободными частицами, в соответствии с законами термодинамики находятся в состоянии непрерывного хаотического теплового движения, причём средняя  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}}$ ,

где  $k_B \cong 1,4 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $m_e$  – масса электрона. В отличие от спонтанно направленной скорости теплового движения скорость под действием силы Кулона  $\vec{u}$  будет направленной, её называют **средней дрейфовой скоростью**.

4. Пусть в рассматриваемом металлическом проводнике в единице его объёма содержится  $n$  электронов. Выделим далее элементарную площадку  $dS$ , перпендикулярную вектору дрейфовой скорости, являющуюся основанием цилиндра

дра с высотой  $udt$ . Все носители заряда, содержащиеся внутри этого цилиндра, через площадку  $dS$  за время  $dt$  перенесут заряд

$$dq = n \cdot e \cdot u \cdot dS \cdot dt.$$

5. Пронормируем уравнение относительно площади и времени

$$\frac{dq}{dSdt} = j = neu,$$

где  $j$  – плотность тока, т.е. сила тока  $i = dq/dt$ , отнесённая к площади. Плотность тока величина векторная, что определяется направленными свойствами дрейфовой скорости

$$\vec{j} = ne\vec{u}.$$

6. Модуль плотности тока определяет величину заряда, переносимого электрическим полем в единицу времени через единицу площади. Направление вектора  $\vec{j}$  совпадает с направлением дрейфовой скорости носителей заряда.

7. Таким образом, увеличив в два раза величину дрейфовой скорости, получим двукратное увеличение силы тока, т.к. за одно и то же время через поперечное сечение проводника будет проходить в два раза больше носителей заряда.

158. В таблице приведены результаты измерения силы тока через резистор в зависимости от напряжения на нём. Какая сила тока будет протекать через сопротивление при напряжении  $U_x = 3,5$  В?

U, В	0	1	2	3	4	5
I, А	0	2	4	6	8	10

### Решение

1. Поскольку зависимость  $I = f(U)$  носит линейный характер, то справедлив закон Ома для участка цепи, по уравнению которого можно определить сопротивление

$$I = \frac{U}{R}; \quad R = \frac{U}{I} = 0,5 \text{ Ом};$$

2. Сила тока при заданном напряжении

$$I_x = \frac{U_x}{R} = 7 \text{ А}.$$

159. Источник тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$  сначала был замкнут на внешнее сопротивление  $R$ . Затем внешнее сопротивление увеличили. Как при этом изменяется сила тока в цепи и напряжение на внешнем сопротивлении:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

### Решение

1. Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

увеличение внешнего сопротивления повлечёт

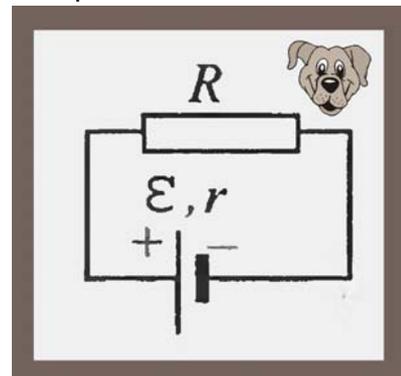


Рис. 159. Замкнутая цепь

за собой уменьшение силы тока через сопротивление.

2. Напряжение на внешнем сопротивлении определим по закону Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}; \quad U = IR = \frac{\varepsilon R}{R + r},$$

напряжение на резисторе увеличится.

160. Существенное уменьшение сопротивления полупроводников при нагревании объясняется:

- А) увеличением числа свободных носителей;
- Б) увеличением скорости дрейфа свободных носителей заряда.

### Решение

1. Скорость дрейфа носителей заряда, например, электронов, зависит, прежде всего, от напряжённости электрического поля в полупроводнике

$$\vec{u} = -\frac{e\vec{E}\tau}{m_e},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $E$  – напряжённость электрического поля,  $\tau$  – время свободного движения,  $m_e$  – масса электрона. При нагревании образца, параметры внешнего поля не изменяются, поэтому увеличения значения дрейфовой скорости не происходит.

2. При нагревании вещества, в соответствии с классической электродинамикой, возрастают амплитуды колебаний элементов кристаллической решётки, что способствует освобождению связанных электронов и переходу их в разряд свободных.

161. Два резистора включены в электрическую цепь последовательно. Как соотносятся показания вольтметров?

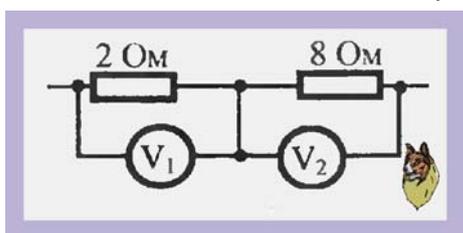


Рис. 161. Последовательные резисторы

### Решение

1. Последовательное соединение сопротивлений характеризуется тем, что через них протекает ток одинаковой силы

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= IR_1; \\ U_2 &= IR_2 \end{aligned} \right\} \frac{U_2}{U_1} = 4;$$

162. Найти сопротивление между точками А и В электрической цепи.

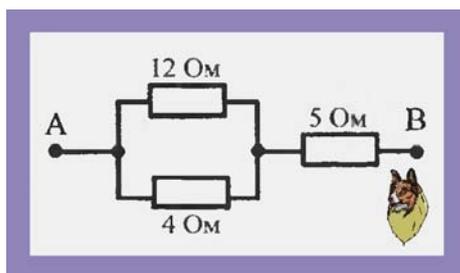


Рис. 162. Сопротивление цепи

### Решение

1. Сопротивление участка АВ

$$R_{AB} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + R_3;$$

$$R_{AB} = \frac{1}{12} + \frac{1}{4} + 5 = \frac{16}{48} + 5 = \frac{1}{3} + 5 = 8 \text{ Ом.}$$

163. Через участок цепи течет постоянный ток силой  $I = 10$  А. Что показывает вольтметр?

**Решение**

1. Через все последовательные сопротивления течёт ток силой  $I = 10$  А, затем он в разветвлении цепи делится пополам, так что через параллельные сопротивления текут одинаковые токи силой по 5 А каждый, что собственно и продемонстрирует вольтметр.

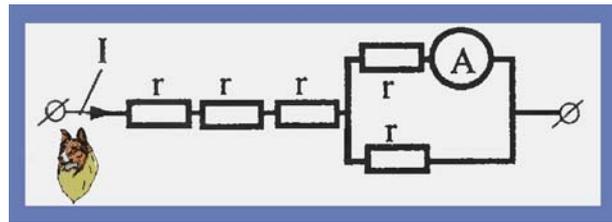


Рис. 163. Показания амперметра

164. ЭДС источника тока  $\varepsilon = 5$  В, внутреннее сопротивление  $r = 1$  Ом, а сопротивление резисторов  $R_1 = R_2 = 2$  Ом. Какое напряжение показывает вольтметр?

**Решение**

1. Определим силу тока, используя закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{2R + r} = \frac{5}{5} = 1 \text{ А};$$

2. Показания вольтметра

$$\varepsilon = Ir + I(R_1 + R_2); \quad U_V = 4 \text{ В};$$

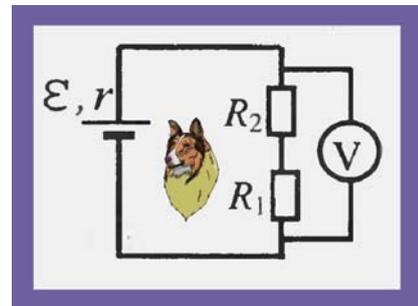


Рис. 164. Показания вольтметра

165. Два последовательных резистора подключены к источнику тока с ЭДС  $\varepsilon$ . Сопротивление первого резистора  $R_1$ , напряжение на нём  $U_1$ . Напряжение на втором резисторе равно  $U_2$ . Чему равно сопротивление второго резистора и внутреннее сопротивление источника тока?

**Решение**

1. Заданные параметры позволяют определить силу тока в цепи

$$I = \frac{U_1}{R_1};$$

2. Падение напряжения на резисторе  $R_2$

$$U_2 = IR_2; \quad R_2 = \frac{U_2 R_1}{U_1};$$

3. Внутреннее сопротивление источника тока определим из закона Ома для полной цепи

$$\varepsilon = Ir + I(R_1 + R_2) = Ir + I \left( R_1 + \frac{U_2 R_1}{U_1} \right) = Ir + IR_1 \left( 1 + \frac{U_2}{U_1} \right);$$

$$\varepsilon - IR_1 \left( 1 + \frac{U_2}{U_1} \right) = Ir; \quad r = \frac{\varepsilon}{I} - R_1 \left( 1 + \frac{U_2}{U_1} \right) = \frac{\varepsilon R_1}{U_1} - R_1 \left( 1 + \frac{U_2}{U_1} \right);$$

$$r = R_1 \left[ \frac{\varepsilon}{U_1} - 1 - \frac{U_2}{U_1} \right] = R_1 \frac{\varepsilon - U_1 - U_2}{U_1};$$

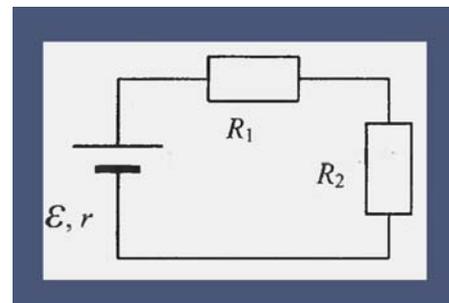


Рис. 165. Полная замкнутая цепь

166. Установить соответствие между физическими величинами и их единицами измерений в системе СИ.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА ВЕЛИЧИНЫ
А) электрическое напряжение	1) Кулон (1 Кл)
Б) электрическое сопротивление	2) Ватт (1 Вт)
В) электрический заряд	3) Ампер (1 А)
	4) Вольт (1 В)
	5) Ом (1 Ом)

Рис. 166. Соответствие величин и их размерностей

А	Б	В
4	5	1

167. Какой из графиков соответствует вольтамперной характеристике полупроводникового диода, включённого в прямом направлении?

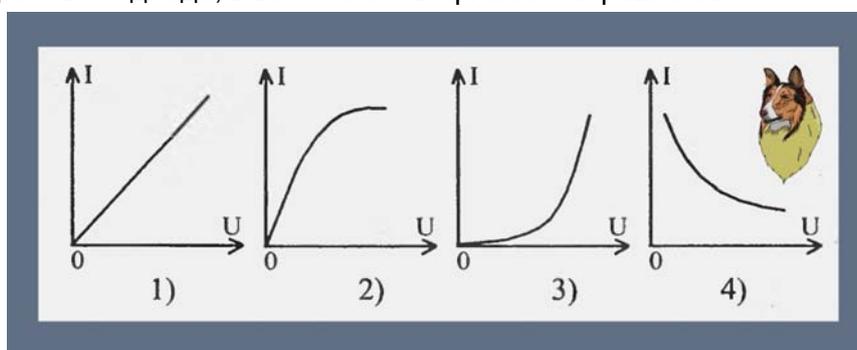


Рис. 167.1. Вольтамперные характеристики полупроводникового диода

### Решение

1. Основной задачей полупроводникового диода является возможность проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном. Идеальный диод должен быть хорошим проводником с нулевым сопротивлением при прямом подключении напряжения (плюс – к аноду, минус – к катоду), и изолятором с бесконечным сопротивлением при обратном.

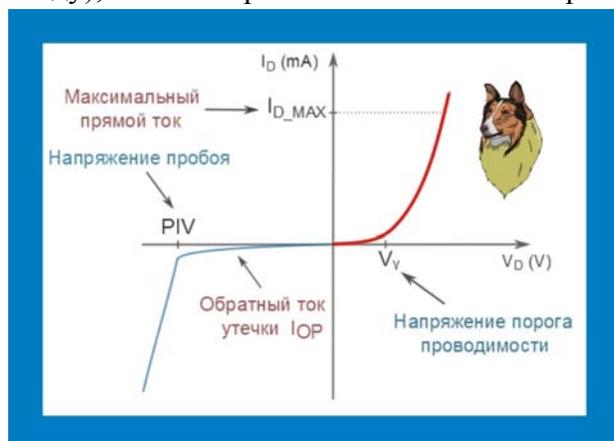


Рис. 167.2. Реальная характеристика диода  
примерно 0,7 В, у германиевых – около 0,3 В.

3. Верным является график №3.

2. При прямом включении напряжение на диоде должно достигнуть определенного порогового значения –  $V_\gamma$ . Это напряжение, при котором р-переход в полупроводнике открывается достаточно, чтобы диод начал хорошо проводить ток. До того как напряжение между анодом и катодом достигнет этого значения, диод является плохим проводником.  $V_\gamma$  у кремниевых приборов

168. При одном сопротивлении реостата  $R$  вольтметр показывает  $U_1 = 6$  В, амперметр –  $I_1 = 1$  А. При другом положении  $R$  показания приборов:  $I_2 = 2$  А,  $U_2 = 4$  В. Определить внутреннее сопротивление источника тока.

**Решение**

1. Определим величины сопротивлений реостата

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = 6 \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} = 2 \text{ Ом};$$

2. Составим систему уравнений на основании закона Ома для полной цепи

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{\varepsilon}{R_1 + r}; \\ I_2 &= \frac{\varepsilon}{R_2 + r}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1 + r}{R_2 + r}; \quad r = R_1 - 2R_2 = 2 \text{ Ом};$$

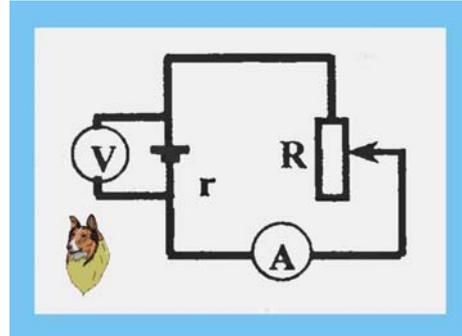


Рис. 168. Внутреннее сопротивление

169. Два вертикально расположенных стержня, имеющие длину  $L = 1$  м и диаметр  $d = 1$  см сопротивление на единицу длины  $\rho = 1 \cdot 10^{-5}$  Ом·м, подсоединены через идеальный амперметр к источнику ЭДС  $\varepsilon = 1,5$  В и внутренним сопротивлением  $r_0 = 0,05$  Ом. Скользящие контакты соединены с сопротивлением  $R = 0,1$  Ом, которое в поле тяжести  $g$  начинает соскальзывать вдоль них из верхней точки вниз без нарушения контакта, как показано на рисунке. В пренебрежении эффектами, связанными с магнитным полем, определить какое значение тока  $I$  покажет амперметр через время  $\tau = 0,5$  с после начала движения? Силу трения не учитывать.

**Решение**

1. Запишем кинематические уравнения движения сопротивления, считая, что на него действует только сила тяжести и движение происходит по вертикальной оси с нулевой начальной скоростью

$$y = \frac{gt^2}{2},$$

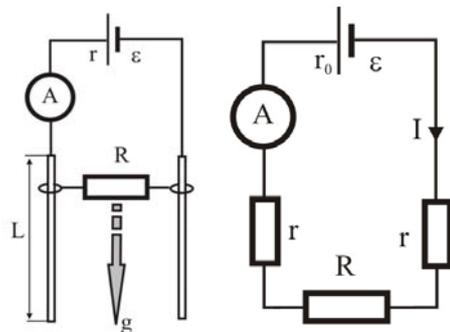


Рис. 169. Скольжение сопротивления

и определим расстояние, которое пройдет сопротивление за время  $\tau$

$$\ell = \frac{5 \cdot 0,5^2}{2} = 0,625 \text{ м}.$$

2. Электрическое сопротивление одного отрезка стержня длиной  $\ell$

$$r = \rho \frac{4\ell}{\pi d^2} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{4 \cdot 0,625}{3,14 \cdot 10^{-4}} \cong 0,08 \text{ Ом}.$$

3. Электрическая схема установки, таким образом представит собой три последовательно включенных внешних сопротивления:  $R_0 = R + 2r$  и внутреннее сопротивление источника  $r_0$ . Закон Ома для полной цепи в этом случае запишется так

$$I = \frac{\varepsilon}{R + 3r + r_0} = \frac{1,5}{0,1 + 0,16 + 0,05} \cong 4,8 \text{ А}.$$

170. Электрическая схема состоит из двух конденсаторов  $C_1 = 2 \text{ мкФ}$  и  $C_2 = 4 \text{ мкФ}$  и трёх сопротивлений  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$ . В цепь включён идеальный источник тока с  $\varepsilon = 100 \text{ В}$ . Определить падение напряжения на конденсаторах  $U_1$ ,  $U_2$  и их заряд  $Q_1$ ,  $Q_2$ .

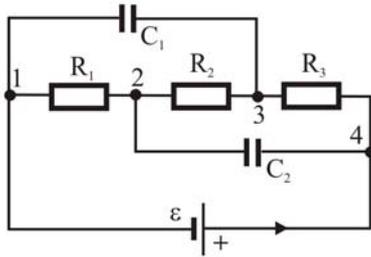


Рис. 170. Емкости и резисторы

### Решение

1. Падение напряжения  $U_1$  на конденсаторе  $C_1$  равно разности потенциалов между точками цепи 1 и 3, а напряжение на  $C_2$  определяется разностью потенциалов между точками 2 и 4

$$U_1 = \varphi_3 - \varphi_1, \quad U_2 = \varphi_4 - \varphi_2.$$

2. После зарядки конденсаторов цепь будет представлять собой три последовательно соединённых сопротивления

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 = 400 \text{ Ом}.$$

3. Определим силу тока в цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0} = \frac{100}{400} = 0,25 \text{ А}.$$

4. Определим величину напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  которые, как следует из уравнений будут равны сумме падений напряжения на сопротивлениях  $U_1 = U_{R1} + U_{R2}$ ,  $U_2 = U_{R3} + U_{R4}$

$$U_1 = I(R_1 + R_2) = 0,25 \cdot 300 = 75 \text{ В},$$

$$U_2 = I(R_3 + R_4) = 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ В},$$

5. Заряд конденсаторов определим, используя взаимосвязь падения напряжения заряда и ёмкости

$$U_1 = C_1 U_1 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 75 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл},$$

$$U_2 = C_2 U_2 = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}.$$

171. В электрической цепи ползунок реостата перемещают вправо. Как, при этом изменяются показания идеального вольтметра и амперметра?

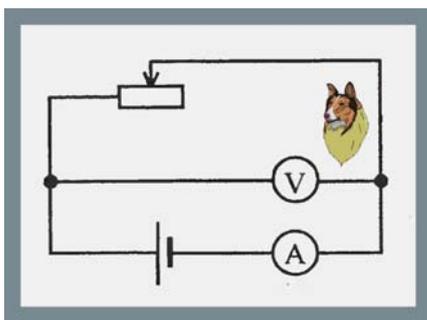


Рис. 171. Реостат в цепи

### Решение

1. При перемещении движка вправо сопротивление реостата увеличивается от  $R$  до  $\zeta R$ , так как

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R + r}; \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{\zeta R + r},$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\zeta R + r}{R + r}; \quad \Rightarrow I_1 > I_2$$

сила тока в цепи должна уменьшаться.

2. Показания вольтметра будут увеличиваться, потому что он включён на два параллельных сопротивления  $r$  и  $R$ , одно из которых увеличивается в  $\zeta$  раз

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{r}; \quad R_1 = \frac{Rr}{R+r}; \quad U_{V(1)} = I_1 R_1 = \frac{\varepsilon \frac{Rr}{R+r}}{\frac{Rr}{R+r} + r} = \frac{\varepsilon R}{2R+r}; \quad U_{V(2)} = I_2 R_2;$$

$$R_2 = \frac{\zeta R r}{\zeta R + r}; \quad U_{V(2)} = \frac{\varepsilon \zeta R}{2\zeta R + r}; \quad U_2 > U_1;$$

172. В схеме для измерения ЭДС источника  $\varepsilon$  и его внутреннего сопротивления  $r$  вольтметр показывал  $U_1 = 5$  В, амперметр  $I_1 = 1$  А. После размыкания переключателя  $K$  вольтметр стал показывать напряжение  $U_2 = 6$  В. Определить величину ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока  $r$ .

### Решение

1. При размыкании ключа вольтметр демонстрирует величину ЭДС  $U_2 = \varepsilon = 6$  В.

2. При замыкании цепи она становится полной

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R + r}; \quad I_1 R + I_1 r = \varepsilon; \quad I_1 R = U_1 = 5 \text{ В};$$

$$I_1 r = U_r; \quad \Rightarrow r = \frac{\varepsilon - U_1}{I_1} = 1 \text{ Ом};$$

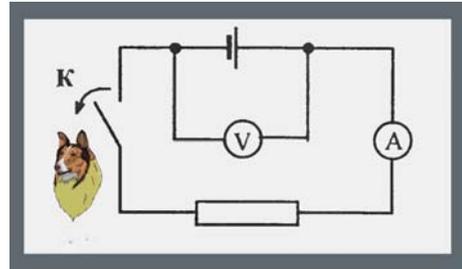


Рис. 172. Показания приборов

173. Исследуется электрическая цепь. Определить уравнения, соответствующие величинам, которые показывают амперметр и вольтметр, если все параметры элементов схемы заданы.

ПОКАЗАНИЯ ПРИБОРОВ	ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ПОКАЗАНИЙ ПРИБОРОВ
А) показания амперметра	1) $\frac{\varepsilon R_L}{R_n + R_p + r}$
Б) показания вольтметра	2) $\varepsilon R_n - \varepsilon(R_p + r)$
	3) $\varepsilon(R_n + R_p + r)$
	4) $\frac{\varepsilon}{R_n + R_p + r}$

Рис. 173.1. Соответствие уравнений величинам

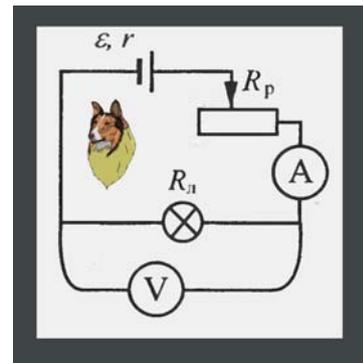


Рис. 173.2. Определение силы тока и напряжения

### Решение

1. Уравнение 4 соответствует показаниям амперметра. В соответствии с законом Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\Sigma} + r} = \frac{\varepsilon}{R_L + R_p + r};$$

2. Вольтметр подключен параллельно лампочке, поэтому показывает падение напряжения на ней

$$U = IR_L = \frac{\varepsilon R_L}{R_L + R_p + r},$$

что соответствует уравнению 1.

174. Два резистора включены в электрическую цепь параллельно. Через резисторы текут токи  $I_1 = 0,8$  А,  $I_2 = 0,2$  А. Найти отношение величин резисторов.

### Решение

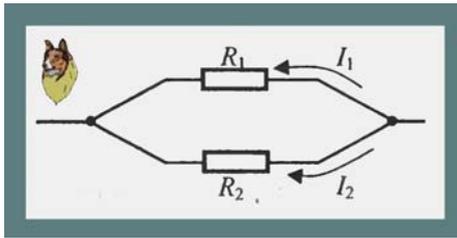


Рис. 174. Параллельные резисторы

1. На основании закона Ома для участка цепи составим систему уравнений с учётом того, что на резисторах ввиду их параллельности падает одинаковое напряжение  $U$ , но текут токи разной силы

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1}; \\ I_2 &= \frac{U}{R_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = 4; R_1 = \frac{1}{4}R_2;$$

175. Приведен график зависимости силы тока в проводнике от напряжения на его концах. Чему равно сопротивление проводника?

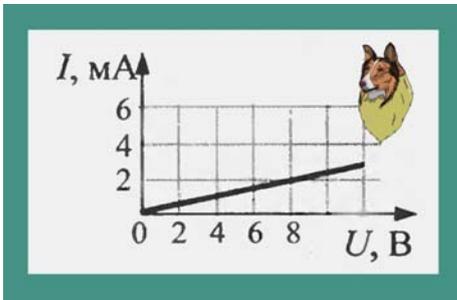


Рис. 175. Сопротивление проводника

### Решение

1. Для проводника, как и для любого прочего сопротивления справедлив закон Ома для участка цепи. Ввиду линейной зависимости силы тока от напряжения расчетную точку на графике выбираем из удобства вычислений

$$R = \frac{U}{I} = \frac{8}{2 \cdot 10^{-3}} = 4 \text{ кОм.}$$

176. Приведена фотография электрической цепи. Показания амперметра приведены в амперах. Что покажет идеальный вольтметр, если его подключить к сопротивлению  $R = 1 \text{ Ом}$ ?

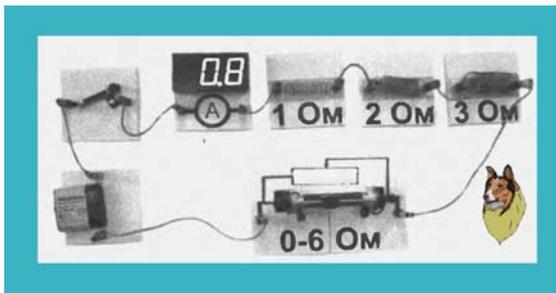


Рис. 176. Фотография цепи

### Решение

1. Все сопротивления, включая реостат, соединены последовательно, т.е. через них течёт ток одинаковой силы, поэтому, используя закон Ома для участка цепи, получим:

$$U = IR = 0,8 \text{ В.}$$

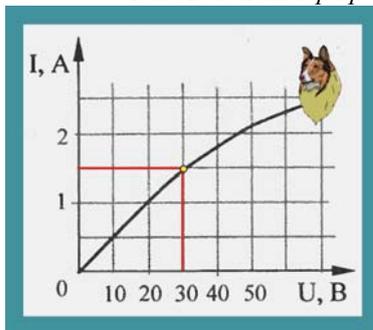


Рис. 177. Сила тока в лампе накаливания

177. Дан график зависимости силы тока в лампе от напряжения на её клеммах. Определить мощность лампы при силе тока  $I = 1,5 \text{ А}$ .

### Решение

1. При силе тока  $I = 1,5 \text{ А}$  на сопротивлении лампы накаливания, судя по приведённому графику, падает напряжение  $U = 30 \text{ В}$ , поэтому в заданном режиме лампа потребляет электрическую мощность:

$$P = IU = 30 \cdot 1,5 = 45 \text{ Вт}.$$

178. Проводники изготовлены из одного и того же материала. Какую пару проводников нужно выбрать, чтобы опытным путём обнаружить зависимость сопротивления проволоки от её диаметра?

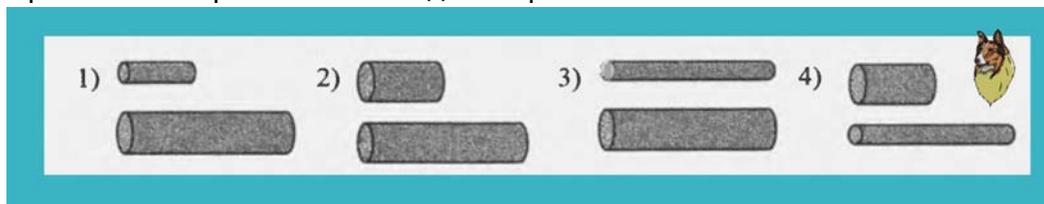


Рис. 178. Образцы проводников

### Решение

1. Сопротивление цилиндрического проводника, каковой является проволока, определяется уравнением

$$R = \rho \frac{\ell}{s} = \rho \frac{4\ell}{\pi d^2},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $\ell$  – длина проводника,  $s$  – площадь его поперечного сечения,  $d$  – диаметр проводника. Чтобы получить зависимость  $R = f(d)$  необходимо брать проводники одинаковой длины, но разного диаметра.

179. При разомкнутой цепи вольтметр показывает напряжение  $U_1 = 8 \text{ В}$ , при замкнутой цепи  $U_2 = 7 \text{ В}$ . Сопротивление внешней цепи  $R = 3,5 \text{ Ом}$ . Определить внутреннее сопротивление источника тока.

### Решение

1. При разомкнутой цепи, режим холостого хода источника тока, вольтметр показания вольтметра равны ЭДС источника

$$U_1 = \varepsilon = 8 \text{ В};$$

2. Сила тока в замкнутой цепи

$$I = \frac{U_2}{R};$$

3. С другой стороны, на основании закона Ома для полной цепи

$$IR + Ir = \varepsilon; \quad Ir = \varepsilon - U_2; \quad \frac{U_2}{R}r = \varepsilon - U_2; \quad r = \frac{R(\varepsilon - U_2)}{U_2} = 0,5 \text{ Ом}.$$

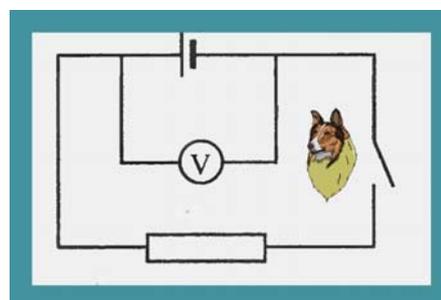


Рис. 179. Внутреннее сопротивление

180. Три резистора, с сопротивлениями  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 9 \text{ Ом}$ , включены параллельно в цепь постоянного тока. Чему равно отношение работ электрического тока, совершённых при прохождении тока через эти резисторы за одинаковое время?

### Решение

1. Работа, совершаемая электрическими силами, преобразуется, в конечном счете, в тепло, количество которого определяется законом Джоуля – Ленца

$$A \equiv Q = IU\tau = \frac{U^2}{R} \tau;$$

2. Резисторы включены параллельно, поэтому падение напряжения на них будет одинаковым, и время протекания тока одинаковое, поэтому, если работу, производимую в первом резисторе принять за 1, то во втором резисторе работа составит 0,2 от первой и в третьем – 0,3, т.е.

$$A_1 : A_2 : A_3 = 3 : 2 : 1;$$

181. Электрическая схема состоит из двух конденсаторов  $C_1 = 2 \text{ мкФ}$  и  $C_2 = 4 \text{ мкФ}$  и трёх сопротивлений  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$ . В цепь включён идеальный источник тока с  $\varepsilon = 100 \text{ В}$ . Определить падение напряжения на конденсаторах  $U_1$ ,  $U_2$  и их заряд  $Q_1$ ,  $Q_2$ .

#### Решение

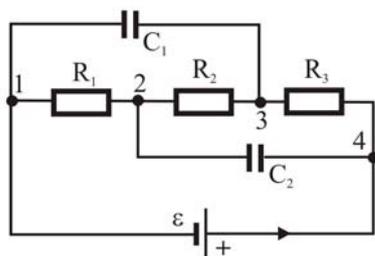


Рис. 181. Ёмкости и резисторы

1. Падение напряжения  $U_1$  на конденсаторе  $C_1$  равно разности потенциалов между точками цепи 1 и 3, а напряжение на  $C_2$  определяется разностью потенциалов между точками 2 и 4

$$U_1 = \varphi_3 - \varphi_1, \quad U_2 = \varphi_4 - \varphi_2.$$

2. После зарядки конденсаторов цепь будет представлять собой три последовательно соединённых сопротивления

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 = 400 \text{ Ом}.$$

3. Определим силу тока в цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0} = \frac{100}{400} = 0,25 \text{ А}.$$

4. Определим величину напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  которые, как следует из уравнений будут равны сумме падений напряжения на сопротивлениях  $U_1 = U_{R1} + U_{R2}$ ,  $U_2 = U_{R3} + U_{R4}$

$$U_1 = I(R_1 + R_2) = 0,25 \cdot 300 = 75 \text{ В},$$

$$U_2 = I(R_3 + R_4) = 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ В},$$

5. Заряд конденсаторов определим, используя взаимосвязь падения напряжения заряда и ёмкости

$$Q_1 = C_1 U_1 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 75 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл},$$

$$Q_2 = C_2 U_2 = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}.$$

## 8. Магнитное поле

182. Два параллельных проводника, по которым течёт ток в одном направлении, притягиваются. Это объясняется тем, что:

- 1) токи непосредственно взаимодействуют друг с другом;
- 2) электростатические поля зарядов в проводниках непосредственно взаимодействуют друг с другом;
- 3) магнитные поля токов непосредственно взаимодействуют друг с другом;
- 4) магнитное поле одного проводника с током действует на движущиеся заряды во втором проводнике?

### Решение

1. Первый проводник с током в окружающем пространстве создаёт, как обнаружил Эрстед, магнитное поле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I$  – сила тока в проводнике,  $r$  – расстояние от проводника до точки наблюдения поля.

2. Второй проводник можно рассматривать как систему направленно движущихся электронов, на которые в магнитном поле действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = e(\vec{v} \times \vec{B}), \quad |\vec{F}_L| = evB \sin(\vec{v}; \vec{B}),$$

где  $e$  – заряд электрона,  $v$  – дрейфовая скорость электронов в проводнике. Для случая взаимодействия двух параллельных проводников

$$(\vec{v}; \vec{B}) = 90^\circ; \Rightarrow \sin(\vec{v}; \vec{B}) = 1; \quad |\vec{F}_L| = evB;$$

3. Если рассматривать проводник длины  $\ell$  и все силы Лоренца просуммировать, то придём к уравнению силы Ампера

$$\vec{F}_A = I(\vec{\ell} \times \vec{B}); \quad F_A = IB\ell;$$

4. Таким образом, верным является четвёртое утверждение о том, что проводники с токами взаимодействуют, потому что магнитные поля действуют на движущиеся заряды.

183. Магнитное поле  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$  создано в точке А двумя параллельными проводниками с токами  $I_1$  и  $I_2$  расположенными перпендикулярно плоскости чертежа. Определить направление векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ .

### Решение

1. Линии магнитного поля прямолинейного проводника образуют concentric окружности. При расположении двух и трёх витков рядом, поля каждого из витков накладываются друг на

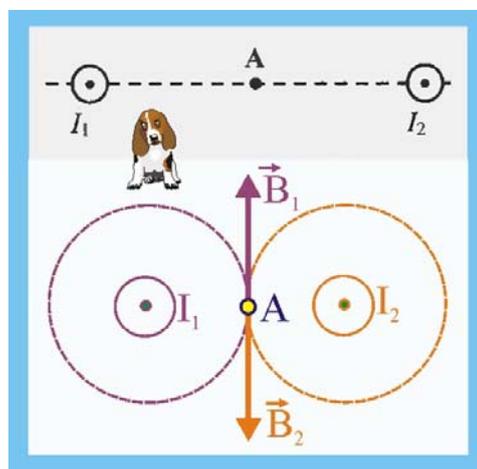


Рис. 183.1. Направление индукции

друга, при этом можно считать, что каждый виток как будто присоединён к самостоятельному источнику тока.

2. В ходе экспериментов было обнаружено, что неподвижный электрический заряд не взаимодействует с магнитным полем. Между ними не проявляются силы притяжения и отталкивания, однако, если заряд или магнит привести в движение, то между ними тот час же появится сила взаимодействия, стремящаяся вращать их друг относительно друга.

3. Сила взаимодействия зависит от относительной скорости перемещения и взаимного направления движения. Вокруг движущихся зарядов возникают замкнутые силовые линии, по отношению к которым векторы возникающих магнитных сил будут направлены по касательной. Концентрические силовые линии будут охватывать всю траекторию движущихся зарядов.

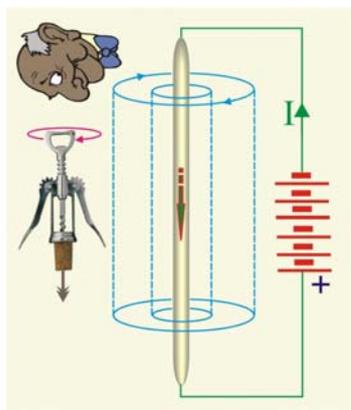


Рис. 183.2. Направление поля

4. Картина силовых линий показывает, что линии действия магнитных сил лежат в плоскости перпендикулярной направлению течения тока. Направление магнитного поля принято определять по правилу буравчика (рис. 183.2).

5. Если поступательное направление винта (буравчика, штопора) совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения головки винта или штопора будет соответствовать направлению линий магнитного поля. Можно воспользоваться и другим правилом. Если смотреть по направлению тока, то магнитные линии будут направлены в сторону движения часовой

стрелки.

6. Следует особо отметить отличие движений исследуемых в рамках электродинамики от механических перемещений. Механическое движение характеризует изменение взаимного положения тел относительно друг друга или относительно выбранной системы отсчёта. Электрический ток сопряжён с перемещением носителей заряда, однако явление возникновения тока не может быть сведено к одним только перемещениям носителей.

7. Дело в том, что заряженные частицы перемещаются вместе с собственным электрическим полем, а движение электрического поля, в свою очередь инициирует возникновения поля магнитного. В этой связи по своей сущности электрический ток сопряжён с магнитным полем. Напряжённость этого поля в любой точке пространства пропорциональна силе тока. Устоялось мнение, что магнитное поле не может быть получено отдельно и независимо от электрического тока. Магнитные поля намагниченных тел, например, природные магниты, тоже имеет таковые свойства вследствие особенностей их внутриатомных токов. Возникновение магнитных полей не связано с физическими характеристиками проводника, а определяется исключительно силой текущего по ним тока.

8. С позиций магнетизма, термин «сила тока» не совсем адекватен обстоятельствам. Величина тока (это более конкретное определение) на самом деле можно рассматривать как быстроту переноса количества заряда, так и математически определён ток. С другой стороны величина тока однозначно определяет магнитное поле тока, т.е. синтезирует в себе сложную картину действительных перемещений заряженных частиц.

184. Что наблюдалось в опыте Эрстеда:

- 1) Взаимодействие двух параллельных проводников с током;
- 2) Взаимодействие магнитных стрелок;
- 3) Поворот магнитной стрелки вблизи проводника с током;
- 4) Возникновение электрического тока в катушке при вдвигании в неё магнита?

магнита?

### Решение

1. Эрстед был первым, кто подтвердил экспериментально, что проводники с током создают в окружающем пространстве магнитное поле, что было доказано посредством магнитной стрелки, которая вблизи проводника с током переставала реагировать на магнитное поле Земли, а становилась перпендикулярно направлению проводника.



Рис. 184. Открытие Эрстеда

185. В однородном магнитном поле находится рамка, по которой начинают пропускать ток. Определить направление силы, действующей на верхнюю сторону рамки.

### Решение

1. На горизонтальный участок рамки будет действовать сила Ампера, направление которой можно определить по правилу левой руки: если раскрытую ладонь левой руки разместить так, чтобы в неё входили силовые линии поля, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то отставленный в сторону большой палец покажет направление действующей со стороны магнитного поля силы Ампера.

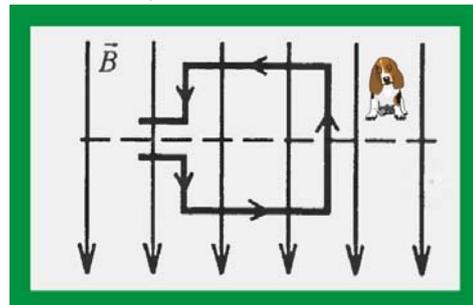


Рис. 185. Рамка в магнитном поле

2. Сила Ампера будет направлена перпендикулярно плоскости чертежа в сторону к наблюдателю.

186. Рамку, площадь которой  $S = 0,5 \text{ м}^2$ , поместили в магнитное поле перпендикулярно к его силовым линиям. Когда по рамке пропустили ток силой  $I = 4 \text{ А}$ , на неё стал действовать момент сил  $12 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Определить значение модуля вектора индукции магнитного поля.

### Решение

1. Важное прикладное значение имеет анализ механических сил, действующих на внесённый в магнитное поле замкнутый контур с током. Во многих технических устройствах осуществляется преобразование энергии магнитного поля в кинетическую энергию вращения.

2. Рассмотрим контур в виде прямоугольной рамки, по которой течёт постоянный ток величиной  $I$ , рамка помещена в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  (рис. 186). Силы, действующие на стороны  $a$ , в соответствии с законом Ампера будут стремиться растянуть или сжать рамку в вертикальных направлениях. Силы, действующие на стороны  $b$ , стремятся вращать рамку вокруг вертикальной оси  $z$ , т.к. по сути это типичная пара сил с моментом

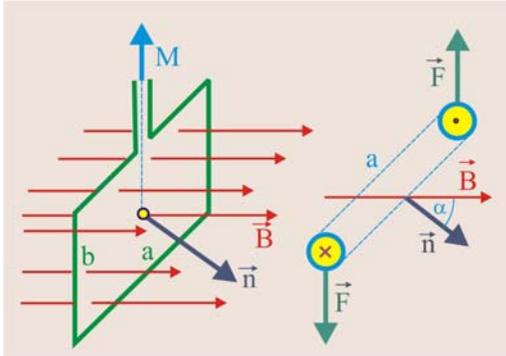


Рис. 186. Контур с током в магнитном поле

$M_z(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$ . Если магнитный момент контура  $p_m = IS$  считать постоянным, то элементарная механическая работа, производимая силами Ампера при повороте контура на угол  $d\alpha$ , определится как

$$\delta A = M_z(\vec{F}_1, \vec{F}_2) d\alpha.$$

3. Поскольку магнитный поток, проходящий через площадь контура  $S$  равен

$$\Phi_m = SB \cos \alpha;$$

то его изменение при повороте контура на угол  $d\alpha$  запишется следующим образом

$$d\Phi_m = SB \sin \alpha d\alpha.$$

4. Последнее уравнение можно переписать так

$$M_z(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = ISB \sin \alpha,$$

т.к. в данном случае  $\sin \alpha = 1$ , то

$$M_z(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = ISB; \Rightarrow |\vec{B}| = \frac{M_z(\vec{F}_1, \vec{F}_2)}{IS} = \frac{12}{0,5 \cdot 4} = 6 \text{ Тл};$$

187. Электрон и протон влетают в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростями  $v$  и  $2v$ . Определить отношение сил, действующих со стороны поля на частицы.

### Решение

1. Со стороны магнитного поля на движущиеся частицы, обладающие одинаковым по модулю зарядом, будет действовать сила Лоренца

$$\left. \begin{aligned} F_e &= qvB; \\ F_p &= q2vB; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{F_e}{F_p} = \frac{1}{2}.$$

188. Две частицы с одинаковыми зарядами и отношением масс  $m_1/m_2 = 4$  влетели в однородные магнитные поля, векторы магнитной индукции которых перпендикулярны их скоростям: первая – в поле с индукцией  $B_1$ , вторая – в поле с индукцией  $B_2$ . Найти отношение времён  $T_2/T_1$ , затрачиваемых частицами на один полный оборот (отношение периодов обращения), если отношение модулей магнитных индукций  $B_1/B_2 = 2$ .

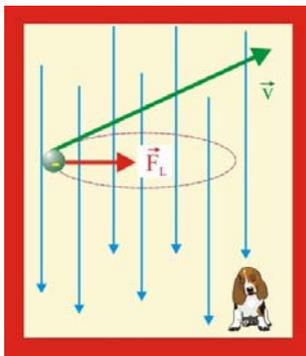


Рис. 188. Частица в магнитном поле

### Решение

1. Частица, влетающая в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям, под действием силы Лоренца и возникшего нормального ускорения (силы инерции) будет двигаться по круговой траектории.

2. Запишем условия стационарности круговых орбит для заданных частиц и полей

$$\left. \begin{aligned} qv_1 B_1 &= \frac{m_1 v_1^2}{r_1}; \\ qv_2 B_2 &= \frac{m_2 v_2^2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB_1 &= \frac{m_1 v_1}{r_1}; \\ qB_2 &= \frac{m_2 v_2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB_1 &= \frac{m_1 \omega_1 r_1}{r_1} \\ qB_2 &= \frac{m_2 \omega_2 r_2}{r_2}; \end{aligned} \right\}$$

3. Отношение условий стационарности орбит

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{m_1 \omega_1}{m_2 \omega_2}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \Rightarrow \quad \frac{B_1}{B_2} = \frac{m_1 T_2}{m_2 T_1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{2};$$

189. Установить соответствие между определением физической величины и названием величины, к которому оно относится.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА
<p>А) Произведение модуля вектора магнитной индукции на силу тока, длину участка проводника и на синус угла между магнитной индукцией и участком проводника</p> <p>Б) Отношение модуля вектора магнитной индукции в однородной среде к модулю вектора магнитной индукции в той же точке пространства в вакууме</p>	<p>1) Магнитная проницаемость среды</p> <p>2) Магнитный поток</p> <p>3) Сила Лоренца</p> <p>4) Сила Ампера</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>

Рис. 189. Соответствие названий и величин

**Решение**

А	Б
4	1

190. Как изменится частота обращения частицы в однородном магнитном поле при уменьшении её скорости в  $n$  раз? ( $v \ll c$ ).

**Решение**

1. Условия нахождения частицы, обладающей разными скоростями на стационарной круговой орбите

$$\left. \begin{aligned} qvB &= \frac{mv^2}{r_1}; \\ qnvB &= \frac{mn^2 v^2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB &= \frac{m\omega_1 r_1}{r_1}; \\ qnB &= \frac{mn\omega_2 r_2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB &= m\omega_1; \\ qB &= m\omega_2; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_1 = \omega_2;$$

2. Ввиду одинаковых циклических частот вращения, будут одинаковыми и частоты

$$2\pi\nu_1 = 2\pi\nu_2;$$

191. Ион  $\text{Na}^+$  влетает в магнитное поле со скоростью  $v$  перпендикулярно силовым линиям. Чему равен радиус его стационарной круговой орбиты в магнитном поле?

### Решение

1. Для иона, лишённого одного электрона, условие стационарности орбиты в магнитном поле с магнитной индукцией  $B$  представится следующим образом

$$evB = \frac{mv^2}{r}; \quad eB = \frac{mv}{r}; \quad \Rightarrow \quad r = \frac{mv}{eB};$$

192. Участок проводника длиной  $\ell = 10$  см находится в магнитном поле с индукцией  $B = 50$  мТл. Сила Ампера при перемещении проводника на  $\Delta r = 8$  см в направлении своего действия совершила работу  $\delta A = 4 \cdot 10^{-3}$  Дж. Проводник располагался перпендикулярно силовым линиям поля. Определить силу тока, протекавшего по проводнику.

### Решение

1. Сила Ампера, действующая на проводник с током расположенный перпендикулярно силовым линиям магнитного поля

$$F_A = IB\ell;$$

2. Работа силы Ампера на перемещении  $\Delta r$

$$\delta A = F_A \Delta r = IB\ell \Delta r; \quad \Rightarrow \quad I = \frac{\delta A}{B\ell \Delta r} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 10 \text{ A};$$

193. Дан график изменения силы тока в катушке индуктивностью  $L = 6$  Гн. Найти величину ЭДС самоиндукции.

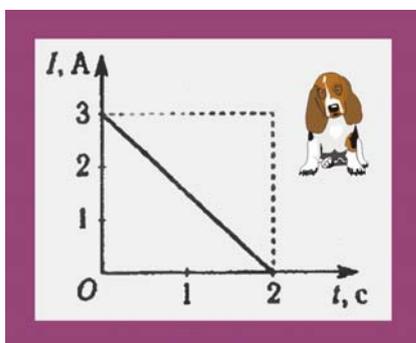


Рис. 193.1. Зависимость силы тока от времени

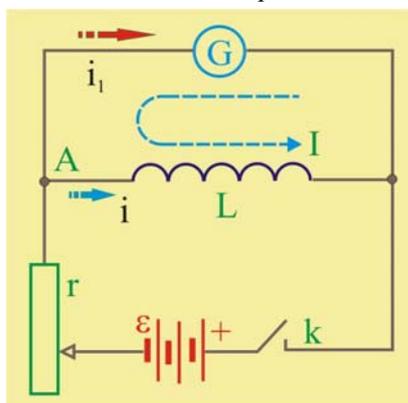


Рис. 193.2. Самоиндукция

### Решение

1. Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях изменения магнитного потока через контур. В частности ЭДС индукции может генерироваться в самом контуре при изменении в нём величины тока, что приводит к появлению дополнительных токов. Это явление получило название самоиндукции, а дополнительно возникающие токи называются экстратоками или токами самоиндукции.

2. Исследовать явление самоиндукции можно на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 193.2. Катушка  $L$  с большим числом витков, через реостат  $r$  и переключатель  $k$  подсоединяются к источнику ЭДС  $\varepsilon$ . Дополнительно к катушке подключён гальванометр  $G$ . При замкнутом переключателе в точке  $A$  ток будет ветвиться, причём ток величиной  $i$  будет протекать через катушку, а ток  $i_1$  через гальванометр. Если затем пе-

реключатель разомкнуть, то при исчезновении в катушке магнитного потока возникнет экстраток размыкания  $I$ . По закону Ленца экстраток будет препятствовать уменьшению магнитного потока, т.е. будет направлен в сторону убывающего тока, а вот через гальванометр экстраток пройдет в направлении противоположном первоначальному, что приведет к броску стрелки гальванометра в обратном направлении. Если катушку снабдить железным сердечником, то величина экстратока увеличивается. Вместо гальванометра в этом случае можно включить лампочку накаливания, при возникновении тока самоиндукции лампочка будет ярко вспыхивать.

3. Известно, что магнитный поток, сцепленный с катушкой пропорционален величине протекающего по ней тока

$$\psi = Li,$$

коэффициент пропорциональности  $L$  называется индуктивностью контура.

4. Размерность индуктивности определяется уравнением  $\psi$

$$L = \frac{d\psi}{i}, \quad [L] = \frac{Вб}{А} = Гн (\text{генри}).$$

5. Получим уравнение ЭДС самоиндукции  $\epsilon_{si}$  для катушки

$$\epsilon_{si} = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -\left(L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{dt} i\right).$$

6. В общем случае индуктивность, наряду с геометрией катушки в средах может зависеть от силы тока, т.е.  $L = f(i)$ , это можно учесть при дифференцировании

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{di} \frac{di}{dt}.$$

7. ЭДС самоиндукции с учётом значения  $dL/dt$  представится следующим уравнением

$$\epsilon_{si} = -\left(L + \frac{dL}{di}\right) \frac{di}{dt}.$$

8. Если индуктивность не зависит от величины тока, уравнение упрощается

$$\epsilon_{si} = -L \frac{di}{dt},$$

для графика, заданного по условию задачи сила тока во времени меняется линейно, поэтому уравнение ЭДС самоиндукции примет вид:

$$\epsilon_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -6 \frac{3}{2} = 9 \text{ В};$$

194. Тонкая металлическая рейка массы  $m = 1$  кг и длины  $l = 1$  м лежит на плоском шероховатом горизонтальном полу в поле тяжести и однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1$  Тл, вектор которой направлен вертикально. Коэффициент трения между полом и рейкой  $\mu = 0,1$ . Рейку с помощью легких и гибких проводников подключают к источнику постоянного тока и одновременно сообщают ей начальную скорость  $v_0$ , вектор которой направлен вдоль пола перпендикулярно длинной стороне рейки. Определить силу тока  $I$ , текущего через рейку, если известно, что после начального толчка она продолжает скользить по полу равномерно.

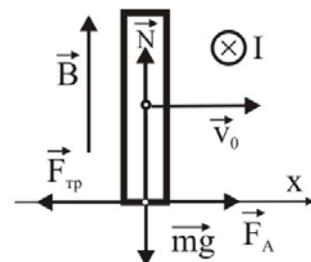


Рис. 194. Движение рейки

## Решение

1. Рейка находится под действием системы четырёх сил, лежащих в одной плоскости  $\{mg, F_{\text{тр}}, N, F_A\}$ , причём, линии действия сил трения  $F_{\text{тр}}$  и Ампера  $F_A$  совпадают с осью  $x$ .

2. Тело может двигаться равномерно и прямолинейно, вдоль какой либо из осей в том случае, если сумма проекций сил, действующих на тело на эту ось равна нулю. В данном случае это возможно при равенстве силы трения и силы Ампера

$$\vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_A = 0, \Rightarrow \mu mg = IB\ell.$$

3. Решая уравнение относительно силы тока, получим

$$I = \frac{\mu mg}{B\ell} = \frac{0,1 \cdot 1 \cdot 10}{1 \cdot 1} = 1 \text{ A}.$$

195. Майкл Фарадей обнаружил:

- 1) отклонение магнитной стрелки при протекании электрического тока по проводу;
- 2) взаимодействие параллельных проводников с током;
- 3) возникновение электрического тока в замкнутой катушке при опускании в неё магнита;
- 4) взаимодействие двух магнитных стрелок?

## Решение

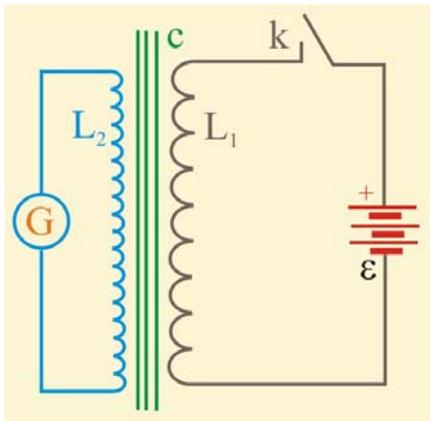


Рис. 195.1. Первые опыты Фарадея

1. Майкл Фарадей, ознакомившись с работами Ампера и его последователей, пришёл к идее обратимости процессов при взаимодействии магнитного поля и электрического тока. В 1831 г. он увлёкся идеей получения электрического тока посредством магнитного поля. Первые эксперименты были просты и оригинальны. На стальной сердечник с были намотаны две катушки  $L_1$  и  $L_2$ , причём первая катушка была подключена к источнику тока  $\varepsilon$ . В цепь второй катушки был включён гальванометр (рис. 195.1).

2. Фарадей менял материал проводников, их форму, количество витков, однако гальванометр перемещение электрических зарядов не фиксировал. Многочисленные изменения конструкции не приносили результатов. В один из дней лабораторных испытаний ассистент Фарадея заметил, что стрелка гальванометра ощутимо дернулась при выключении установки переключателем  $k$ . Подключая и отключая катушку  $L_1$  к источнику тока, экспериментаторы обнаружили броски стрелки. Стало ясно, что во втором контуре, замкнутом на гальванометр ЭДС возникает только в моменты времени, когда магнитная индукция исходного поля либо возрастает, либо уменьшается.

3. Проверка обнаруженной закономерности была проверена при вдвигании и выдвигании постоянного магнита внутрь многовитковой катушки, замкнутой на гальванометр (рис. 195.2). Перемещение магнита сопровождалось возбуждением тока в катушке, который получил название индукционного.

4. Зафиксированные экспериментально факты индуцирования ЭДС Фарадей объяснил исходя из следующих предпосылок. Если магнитное поле изображать посредством линий индукции, то одной из характеристик будет густота линий. В этой связи Фарадей заключил, что индукционный ток возникает в проводнике только в том случае, если проводник или какая, либо его часть пересекает линии магнитной индукции.

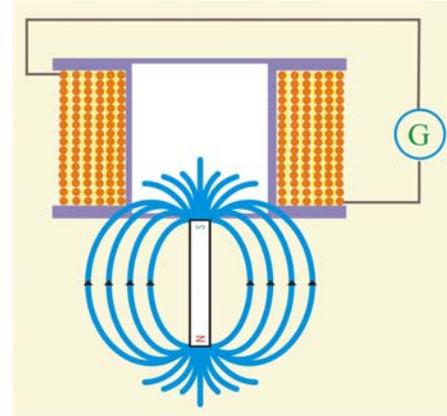


Рис. 195.2. Магнит, вдвигаемый в катушку

5. Эмилий Христофорович Ленц применяя к явлению электромагнитной индукции закон сохранения энергии сформулировал следующее правило в соответствии с которым возникающий в проводнике индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  приводит к возникновению магнитного поля  $\vec{B}_{\text{инд}}$ , направленного в противоположную сторону исходному полю. Другими словами, индукционный ток во всех случаях направлен таким образом, что его действие противоположно действию причины, вызвавшей этот ток.

6. Правило (закон) Ленца применимо к случаям, когда проводник неподвижен, а изменяется внешнее магнитное поле. Правило Ленца подтверждает лишний раз справедливость закона сохранения энергии. Если предположить, что вторичное индуцированное поле имело бы направление, совпадающее с исходным полем, то не существовало бы причин неограниченного возрастания индукционного тока во время всех изменений исходного поля. А на самом деле такового не наблюдается. Возникновение индукционных токов сопровождается совершением дополнительной работы внешними силами, а силы, вызванные индукционным током, препятствуют движению.

196. Задан график изменения силы тока в катушке индуктивности во времени. Определить промежуток времени, в котором ЭДС самоиндукции принимает наибольшее значение.

### Решение

1. Так как изменение силы тока от времени на отдельных временных участках носит линейный характер, то ЭДС самоиндукции в их пределах можно определять уравнением:

$$\varepsilon_{\text{си}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t};$$

2. Из приведенного графика видно, что скорость изменения силы тока  $|\Delta I / \Delta t|$  будет иметь максимальное значение в пределах промежутка времени  $\tau = 5 - 6$  с.

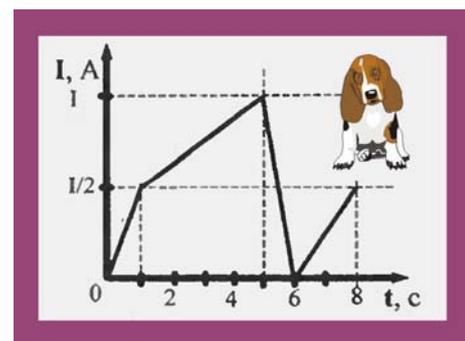


Рис. 196. Зависимость силы тока в катушке от времени

197. Установить соответствие между научными открытиями и именами учёных, которым эти открытия принадлежат.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ	ИМЕНА УЧЕНЫХ
А) закон прямой пропорциональной зависимости между силой тока в проводнике и напряжением на концах проводника	1) Г. Ом
Б) экспериментальное определение величины элементарного электрического заряда	2) Р. Милликен
В) правило для определения направления индукционного тока в проводнике	3) М. Фарадей
	4) А. Ампер
	5) Э.Х. Ленц



Рис. 197. Соответствие научных открытий и их авторов

**Решение**

А	Б	В
1	2	5

198. Четыре одинаковых проволоки длиной  $X$  каждая, связанные на концах шарнирами, образуют квадрат, размещённый в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , перпендикулярной плоскости квадрата. Сопротивление каждой проволоки равно  $R$ . Какой заряд протечёт через гальванометр, соединённый последовательно с одной из проволок, если противоположные вершины квадрата растягивают до тех пор, пока он не превращается в прямой проводник?

**Решение**

1. Возникновение ЭДС индукции в проволочной рамке будет происходить вследствие изменения её площади при превращении квадрата в прямую линию

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -\frac{B\Delta S}{\Delta t};$$

2. ЭДС индукции можно выразить через силу индукционного тока и сопротивление контура в виде четырёх последовательных резисторов с сопротивлением  $R$  каждый

$$\varepsilon_i = i_1 4R;$$

3. Перепишем закон индукции Майкла Фарадея следующим образом:

$$i_1 4R = -\frac{Bx^2}{\Delta t}; \quad i_1 \Delta t 4R = Bx^2; \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{Bx^2}{4R};$$

199. Круглый проволочный виток площадью  $S = 2 \text{ м}^2$  расположен перпендикулярно линиям вектора магнитной индукции однородного магнитного поля. Величина вектора магнитной индукции  $B = 0,04 \text{ Тл}$ . За время  $\Delta t = 0,01 \text{ с}$  индукция магнитного поля равномерно спадает до нуля. Чему равна ЭДС индукции, генерируемая в контуре?

**Решение**

1. Закон индукции Майкла Фарадея

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{\Delta BS}{\Delta t} = -\frac{0,04 \cdot 2}{0,01} = 8 \text{ В};$$

200. По двум рельсам, соединённым перпендикулярной перекладиной, начинают тащить перемычку в указанном направлении. Вся конструкция расположена в магнитном поле, перпендикулярном плоскости, образуемой рельсами. В каком направлении действует сила со стороны магнитного поля на возникающий индукционный ток в перемычке?

### Решение

1. В соответствии с правилом Эмилия Христофоровича Ленца, профессора Петербургского университета: индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, всегда имеет такое направление, что созда-

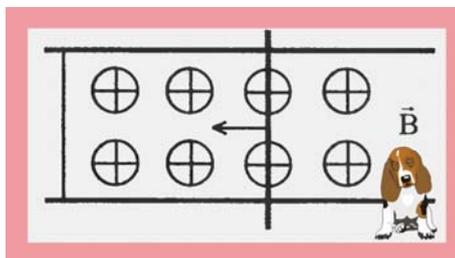


Рис. 200. Контур в магнитном поле

ваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему это магнитное поле. Другими словами, возникающая сила должна препятствовать изменению площади контура, т.е. должна быть направлена в сторону противоположную направлению перемещения перемычки.

201. При пропускании через катушку с сердечником изменяющегося во времени тока у конца сердечника:

- 1) возникает только переменное магнитное поле;
- 2) возникает только переменное вихревое электрическое поле;
- 3) возникает переменное магнитное поле и переменное вихревое электрическое поле;
- 4) не возникает ни магнитного, ни электрического поля.

### Решение

1. Все факты проявления электрических и магнитных полей можно обобщить в виде нескольких утверждений.

**2. Утверждение 1.** Статическое электрическое поле создаётся электрическими зарядами, причём силовые линии электрического поля начинаются и заканчиваются на электрических зарядах. Этому утверждению соответствует теорема Остроградского – Гаусса

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV,$$

где  $d\vec{S}$  – трансформированная в вектор элементарная площадь, путём её умножения скалярно на единичный вектор внешней нормали, т.е.  $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$ ,  $\rho$  – объёмная плотность зарядов. Левая часть уравнения представляет собой поток вектора напряжённости электрического поля через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающая объём  $V$ .

**3. Утверждение 2.** В природе отсутствуют изолированные магнитные заряды (монополи). Математическим содержанием этого утверждения так же является теорема Остроградского – Гаусса, правая часть которой равна нулю

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

**4. Утверждение 3.** Электростатическое поле потенциально, т.е. в нём нет замкнутых силовых линий, а работа поля по замкнутому перемещению всегда равна нулю. Не замкнутость силовых линий математически можно выразить посредством нулевой циркуляции поля по произвольному контуру

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = 0.$$

5. **Утверждение 4.** Вихревое магнитное поле создаётся электрическими токами. Это утверждение математически выражается теоремой о циркуляции вектора индукции магнитного поля

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

где  $\vec{j}$  – вектор плотности тока. Нетрудно видеть, что четвёртое утверждение, ко всему прочему, основано на законе Био – Савара – Лапласа.

6. Дополним эти утверждения выражением для комплексной силы Лоренца, которая действует на движущиеся заряды со стороны электромагнитных полей:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}).$$

7. Все четыре условия, по сути, были сформулированы без учёта особенностей, возникающих при явлении электромагнитной индукции. А суть вот в чём. Если проводящий контур, например круговой, поместить в изменяющийся магнитный поток, то в нём возникает ЭДС индукции, что означает перемещение в нём электрических зарядов. Всякая ЭДС приводит к появлению сил, перемещающих по проводнику заряды. С другой стороны, перемещение зарядов свидетельствует о наличии электрического поля, причём циркуляция этого поля по периметру витка по определению и равна ЭДС индукции, т.е.

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = \varepsilon_i.$$

8. Как известно из математики, если циркуляция некоего векторного поля не равна нулю, то это поле не является потенциальным, а обладает вихревыми свойствами, подобно магнитному полю. Интересно выяснить в этой связи роль проводящего контура. Контур в данном случае является своеобразным индикатором возникшего индукционного тока. Чтобы учесть изложенные выше новые обстоятельства, необходимо сформулированные выше утверждения дополнить законом электромагнитной индукции Майкла Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

9. Подставим далее значение ЭДС индукции

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Последнее уравнение, содержащее закон электромагнитной индукции, даёт основание считать, что переменные магнитные поля всегда сопровождаются возникновением вихревых электрических полей.

202. Катушка с собственным сопротивлением  $R_1 = 0,5$  Ом и индуктивностью  $L = 4$  мГн соединена параллельно с сопротивлением  $R_2 = 2,5$  Ом, по которому течёт постоянный ток силой  $I = 1$  А. Определить количество электричества, индуцированного в катушке при отключении цепи от источника питания.

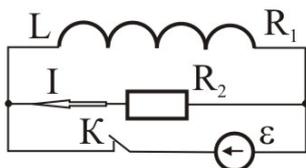


Рис. 202. Отключение катушки

### Решение

1. ЭДС самоиндукции в цепи определится как

$$\langle \varepsilon_i \rangle = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

2. Индукционный ток

$$i = \frac{\langle \varepsilon_i \rangle}{R_1 + R_2}.$$

3. Количество электричества, индуцированное в цепи при её отключении от источника питания

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -L \frac{I}{R_1 + R_2}, \Rightarrow Q = \frac{LI}{R_1 + R_2} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{3} \cong 1,33 \text{ мКл}.$$

203. Найти отношение радиусов окружностей, по которым движутся  $\alpha$  – частица и электрон, влетевшие с одинаковой скоростью в магнитное поле, перпендикулярно силовым линиям. Масса  $\alpha$  – частицы в  $\zeta = 7360$  раз больше массы электрона, а заряд, по модулю, равен двум зарядам электрона.

### Решение

1. Отношение радиусов определится из условий стационарности круговых орбит частиц

$$\left. \begin{aligned} qvB &= \frac{mv^2}{r_e}; \\ 2qvB &= \frac{\zeta mv^2}{r_\alpha}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_\alpha = 3680r_e;$$

204. В однородном магнитном поле вокруг оси AC с одинаковой частотой вращаются две одинаковые проводящие рамки. Каково будет отношение амплитудных значений их ЭДС индукций

### Решение

1. Закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея утверждает, что ЭДС индукции в проводящем замкнутом контуре возникает только в том случае, если контур пронизывается переменным магнитным потоком

$$\Phi_B = BS \cos(\vec{B}; \vec{n});$$

2. Поток может быть переменным вследствие изменения во времени модуля магнитной индукции  $|\vec{B}|$  или его направления, площади контура  $S$  или угла  $(\vec{B}; \vec{n})$  между направлением вектора индукции и нормали.

3. В данном случае, площади контуров, судя по рисунку, одинаковы, движутся они в одном и том же магнитном поле, и вращаясь с одинаковой частотой синхронно меняют  $(\vec{B}; \vec{n})$ , следовательно, амплитудные значения ЭДС индукции будут одинаковы.

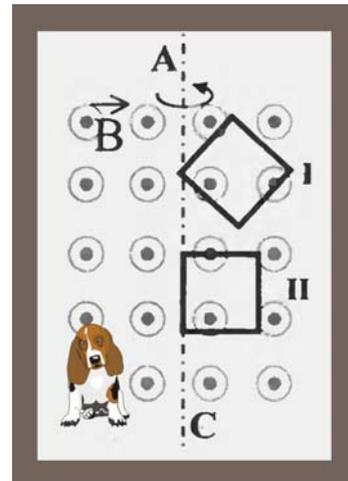


Рис. 204. Вращающиеся в магнитном поле рамки

205. В какой лампе (рис. 205) после замыкания ключа сила тока позже достигнет своего максимального движения?

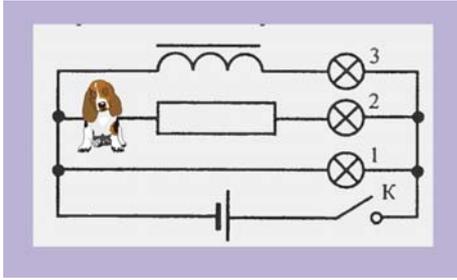


Рис. 205. Лампы накаливания в активной и реактивной цепи

## Решение

1. При подаче питания на схему, изображённую на рис 205 в цепи, содержащей катушку индуктивности величина тока будет увеличиваться от нулевого значения до номинала в течение некоторого промежутка времени вследствие явления самоиндукции.

2. Возникающие экстратоки в соответствии с правилом Ленца всегда направлены противоположно, т.е. они препятствуют вызывающей их причине. **Они препятствуют увеличению тока в цепи.**

3. Экстратоки, в данном случае станут препятствовать увеличению тока в цепи. Закон Ома в этом случае примет вид

$$\varepsilon + \varepsilon_{si} = iR,$$

где  $\varepsilon$  – ЭДС источника,  $\varepsilon_{si}$  – ЭДС самоиндукции,  $i$  – мгновенное значение величины тока, который является функцией времени. Подставим в закон Ома значение ЭДС самоиндукции

$$L \frac{di}{dt} + iR = \varepsilon.$$

Разделим в уравнении переменные

$$L di = (\varepsilon - iR) dt, \quad \frac{Li}{(\varepsilon - iR)} = dt,$$

и проинтегрируем, считая  $L$  постоянной величиной

$$L \int \frac{di}{\varepsilon - iR} = \int dt,$$

$$\frac{L}{R} \ln(\varepsilon - iR) = t + \text{const}.$$

4. Таким образом, общее решение дифференциального уравнения можно представить в виде

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} - \text{const} \cdot te^{-\frac{R}{L}t}.$$

5. Постоянную интегрирования определим из начальных условий. При  $t=0$  в момент подачи питания ток в цепи равен нулю  $i(t) = 0$ . Подставляя нулевое значение тока в уравнение

$$\text{const} = \frac{\varepsilon}{R}.$$

Решение уравнения примет окончательный вид

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

6. Таким образом, в отличие от активных цепей 1 и 2 сила тока в реактивной цепи 3 будет нарастать по экспоненциальному закону. Если известны величины  $i_{\max}$ ,  $\varepsilon$ ,  $L$  и  $R$ , то можно определить время  $t$  в течение которого сила тока достигнет амплитудного значения.

206. Что произойдёт с периодом обращения заряженной частицы в циклотроне, если её скорость увеличить в два раза?

## Решение

1. Циклотрон представляет собой устройство в котором производится ускорение заряженных частиц, вводимых в центр устройства 1. Разгонное электрическое поле создаётся двумя дуантами 3, подключенными к источнику переменного напряжения. Всё устройство находится в магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен скорости частиц. За счёт постоянного магнитного поля на движущиеся частицы действует сила Лоренца, которая заставляет их двигаться по спиральной траектории 2 (рис. 205)

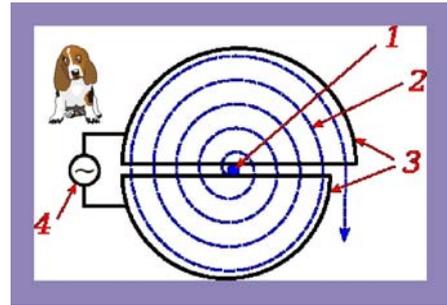


Рис. 206. Схема циклотрона

2. Условия нахождения частицы, обладающей разными скоростями на стационарной круговой орбите

$$\left. \begin{aligned} qvB &= \frac{mv^2}{r_1}; \\ q2vB &= \frac{m2v^2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB &= \frac{m\omega_1 r_1}{r_1}; \\ 2qB &= \frac{2m\omega_2 r_2}{r_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} qB &= m\omega_1; \\ qB &= m\omega_2; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_1 = \omega_2;$$

$$\frac{2\pi}{T_1} = \frac{2\pi}{T_2}; \Rightarrow T_1 = T_2;$$

207. Дан график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре. На каком из графиков правильно показан процесс изменения энергии электрического поля конденсатора?

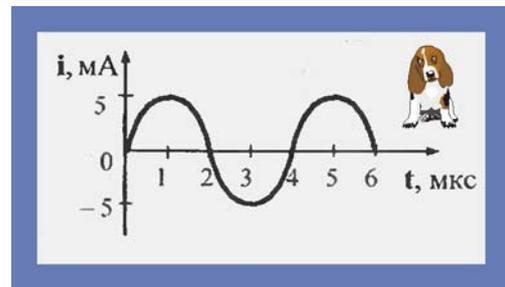


Рис. 207.1. Сила тока в контуре

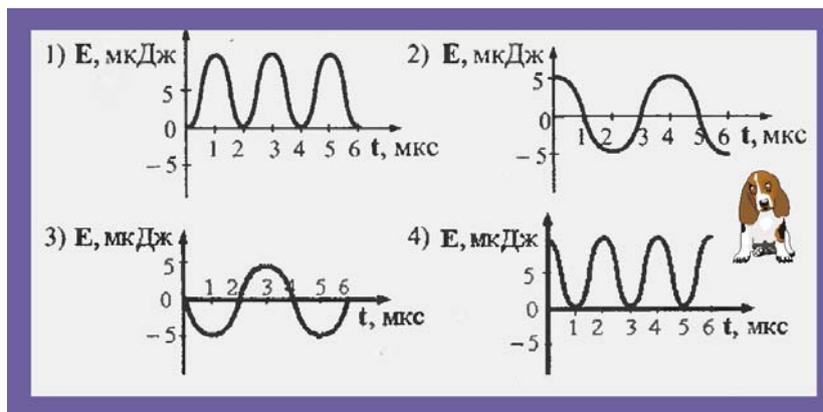


Рис. 207.2. Изменение энергии в колебательном контуре

## Решение

1. Запишем уравнения, описывающие изменение силы тока в индуктивности и напряжения на конденсаторе в функции времени

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \frac{dq}{dt} \approx -\omega q_m \sin \omega t; \\ u(t) &\approx u_m \cos \omega t; \end{aligned} \right\}$$

2. Электрическая компонента энергии колебательного контура определяется как:

$$W_{\text{э}} = \frac{Cu(t)^2}{2};$$

$$u(t)^2 \approx u_m^2 \cos^2 \omega t \approx \frac{1}{2} u_m^2 [1 + 2 \cos(2\omega t)];$$

3. Из последнего уравнения видно, что электрическая составляющая энергии колебательного контура изменяется по закону косинуса и с двойной частотой, т.е. правильным является график № 4.

---

208. Частица массой  $m$ , несущая заряд  $q$ , движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  по окружности радиуса  $r$  со скоростью  $v$ . Что произойдёт с радиусом орбиты  $r$ , периодом обращения  $T$ , и кинетической энергией  $K$  при увеличении скорости до  $\zeta v$ ?

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

### Решение

1. Период обращения

$$qvB = \frac{mv^2}{r}; \quad qvB = \frac{m\omega r}{r}; \quad qvB = m\omega = m \frac{2\pi}{T}; \quad T = \frac{2\pi m}{qB};$$

Скорость не входит в уравнение периода обращения, поэтому величина  $T$  от скорости не зависит.

2. Кинетическая энергия

$$K = \frac{mv^2}{2};$$

При увеличении скорости в  $\zeta$  раз кинетическая энергия увеличится в  $\zeta^2$  раз.

3. Радиус орбиты

$$qvB = \frac{mv^2}{r}; \quad qvB = \frac{mv}{r}; \quad r = \frac{mv}{qB};$$

Увеличение скорости, при сохранении прочих параметров приведёт к увеличению радиуса круговой орбиты.

Радиус орбиты	Период обращения	Кинетическая энергия
1	3	1

## 9. Электромагнитные колебания и волны

209. В колебательном контуре после разрядки конденсатора ток исчезает не сразу, а постепенно уменьшается, перезаряжая конденсатор. Это связано с явлением:

- 1) инерции;
- 2) электростатической индукции;
- 3) самоиндукции;
- 4) термоэлектронной эмиссии?

**Решение**

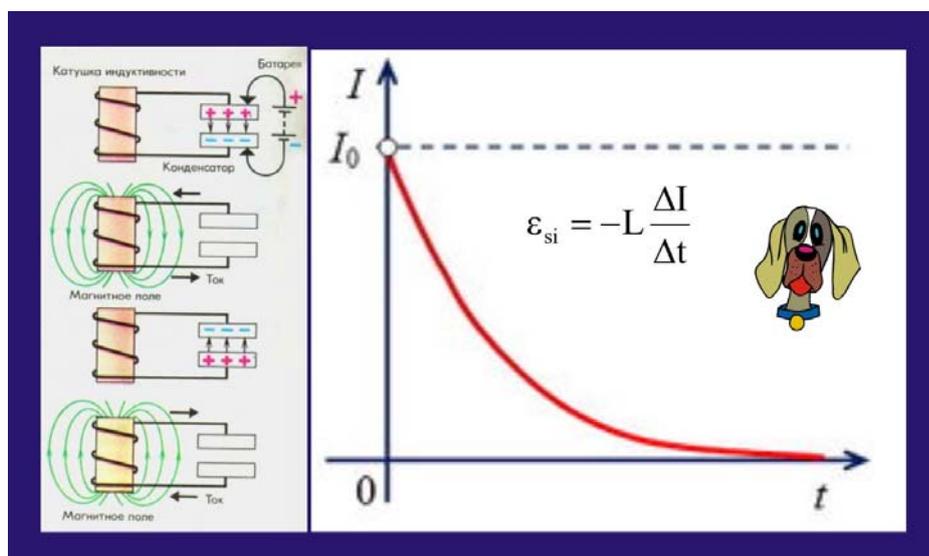


Рис. 209. Процессы в колебательном контуре

1. В колебательном контуре происходит периодическое преобразование энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности

$$W_{\text{э}} \Leftrightarrow W_{\text{м}}; \quad \frac{CU^2}{2} \Leftrightarrow \frac{LI^2}{2};$$

2. При изменении силы тока в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции

$$\epsilon_{\text{си}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

причём направление возникающего магнитного поля по правилу Ленца препятствует изменению магнитного потока, вызывающего этот индукционный ток. Практически это наблюдается в виде экспоненциального уменьшения или нарастания силы тока, текущего через индуктивность.

210. В колебательном контуре в начальный момент времени напряжение на конденсаторе максимально. Через какую долю периода  $T$  электромагнитных колебаний напряжение станет равным нулю?

**Решение**

1. Напряжение на конденсаторе изменяется по гармоническому закону:

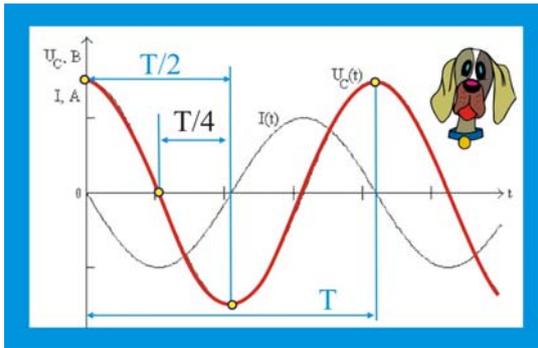


Рис. 210. Изменение напряжения

$$u(t) = u_m \cos \omega t,$$

$$u(t) = u_m \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

где  $u_m$  – амплитудное значение напряжения,  $\omega$  – циклическая частота колебаний в контуре,  $t$  – текущее время,  $T$  – период колебаний.

2. Напряжение на конденсаторе будет равным нулю при

$$\cos \frac{2\pi}{T} t = 0; \quad \frac{2\pi}{T} t = \frac{\pi}{2}; \quad t = \frac{T}{4}.$$

211. Как изменится частота собственных электромагнитных колебаний в контуре, если переключатель К перевести из положения 1 в положение 2?

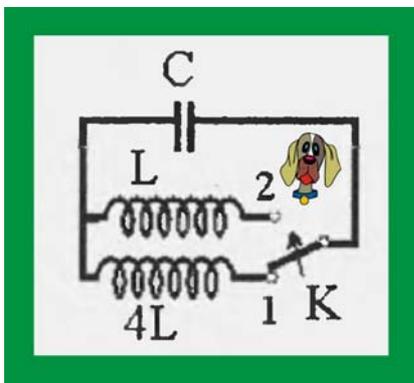


Рис. 211. Изменение индуктивности

### Решение

1. Период электромагнитных колебаний в контуре определяется формулой Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

откуда частота колебаний

$$\nu_1 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4LC}}; \quad \nu_2 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

2. Отношение частот

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{1}{2}; \quad \nu_2 = 2\nu_1;$$

212. Дан график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре, состоящем из последовательно соединённых конденсатора и катушки индуктивности с  $L = 0,2$  Гн. Определить максимальное значение энергии магнитного поля.

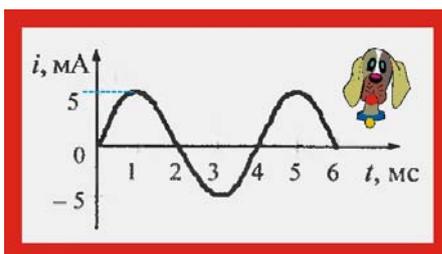


Рис. 212. Зависимость силы тока от времени

### Решение

1. Электромагнитная компонента энергии в колебательном контуре определяется уравнением

$$W_M = \frac{Li^2}{2},$$

максимальное значение энергии

$$W_{M(\max)} = \frac{Li_{\max}^2}{2} = \frac{0,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{2} = 2,5 \text{ мкДж}.$$

213. В таблице показано изменение заряда конденсатора в колебательном контуре от времени.

$t, \text{с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q, 10^{-6} \text{ Кл}$	2	1,42	0	-1,42	-2	-1,42	0	1,42	2	1,42

Определить индуктивность катушки  $L$ , если  $C = 50$  пФ.

### Решение

1. По заданному в таблице периоду колебаний  $T = 8 \cdot 10^{-6}$  с (время между двумя максимумами заряда на конденсаторе) определим искомую величину индуктивности контура, воспользовавшись уравнением Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \Rightarrow L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} \cong \frac{64 \cdot 10^{-12}}{40 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} \cong 32 \text{ мкГн};$$

214. В наборе радиодеталей простого для изготовления простого колебательного контура имеются две катушки с индуктивностями  $L_1 = 1$  мкГн и  $L_2 = 2$  мкГн, а так же два конденсатора, ёмкости которых  $C_1 = 30$  пФ и  $C_2 = 40$  пФ. При каком выборе двух элементов из этого набора частота собственных колебаний контура  $\nu$  будет наибольшей?

### Решение

1. Воспользуемся формулой Томсона для периода собственных колебаний колебательного LC – контура

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \Rightarrow \nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

частота будет наибольшей при  $(LC)_{\min}$ , т.е. при использовании  $L_1$  и  $C_1$ .

215. За долго до открытия электромагнитных волн Генрихом Герцем профессор анатомии Луиджи Гальвани провёл в своей лаборатории опыт, когда мышца препарированной лягушки, к которой был подсоединён провод, натянутый вдоль дома, сокращалась в такт разряду молний. С современной точки зрения его можно трактовать как опыт по обнаружению электромагнитных волн. Поставить в соответствие современные устройства радиосвязи и объекты из опыта Гальвани, которые выполняют одинаковые функции.

### Решение

ОПЫТ ГАЛЬВАНИ		СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
А) лапка препарированной лягушки		1) антенна
Б) медный провод		2) радиоприемник
В) молния		3) радиопередатчик

Рис. 215. Соответствие устройств и объектов

А	Б	В
2	1	3

216. Напряжение на выходных клеммах генератора изменяется по закону  $u(t) = 280\cos 100t$ . Определить действующее значение напряжения.

### Решение

1. Действующее значение напряжения

$$u = \frac{u_m}{\sqrt{2}} = 198,6 \text{ В} \cong 200 \text{ В}.$$

217. Для чего используется повышающий трансформатор на электростанциях?

- 1) увеличения силы тока в линиях электропередач;
- 2) увеличения частоты передаваемого напряжения;
- 3) уменьшения частоты передаваемого напряжения;
- 4) уменьшения доли потерянной энергии на линиях электропередач?

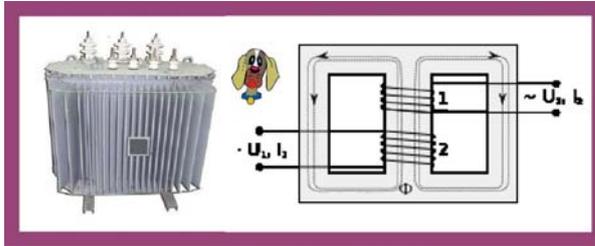


Рис. 217. Повышающий линейный трансформатор

### Решение

1. Электроэнергию, как правило, от генераторов необходимо передавать на значительные расстояния, что сопряжено с потерями на нагревание проводов

$$\Delta Q = IU\Delta t = I^2 R\Delta t ;$$

2. Сопротивление проводов оп-

ределяется их протяжённостью и диаметром

$$R = \rho \frac{\ell}{S} ;$$

3. Поперечное сечение проводов и силу тока в линии можно уменьшить, если передавать высокое напряжение, что достигается применением повышающих трансформаторов.

218. В каком из приведенных случаев в пространстве вокруг описанного объекта возникает электромагнитная волна:

- 1) По проводнику течёт переменный ток;
- 2) по проводнику течёт постоянный ток;
- 3) Заряженная частица движется равномерно и прямолинейно;
- 4) Магнит движется равномерно и прямолинейно?

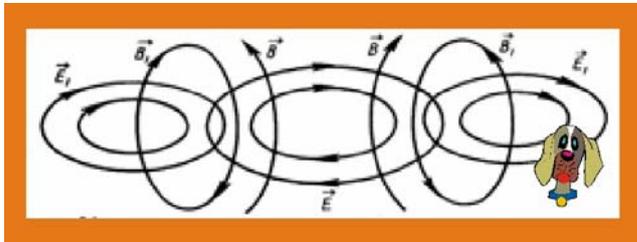


Рис. 218. Структура электромагнитной волны

### Решение

1. В 1830 г. Майкл Фарадей открыл явление электромагнитной индукции: при изменении магнитного поля возникает вихревое электрическое поле. В 1862 г. Джеймс Клерк Максвелл вы-

двинул гипотезу: при изменении электрического поля возникает вихревое магнитное поле. Возникла идея о едином электромагнитном поле.

2. В проводнике, по которому течёт переменный ток, возникает переменное во времени электрическое поле, которое сопровождается появлением вихревого магнитного поля. Взаимодействие электрического и магнитных полей приводит к появлению электромагнитных волн.

219. В колебательном контуре без затухания при увеличении ёмкости на  $\Delta C = 0,2$  мкФ, частота колебаний уменьшилась в 1,2 раза. Определить начальную и конечную ёмкость контура.

### Решение

1. Частота собственных колебаний контура без затухания связана с его параметрами, следующими соотношениями

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} ; \quad \nu_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}} ,$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}; \quad \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 = \frac{C_2}{C_1}; \quad C_2 = C_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2.$$

2. Уравнение позволяет записать изменение ёмкости и найти искомые величины  $C_1$  и  $C_2$

$$\Delta C = C_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 - C_1; \quad \Rightarrow \quad C_1 = \frac{\Delta C}{\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 - 1} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{1,25} = 0,455 \text{ мкФ}.$$

$$C_2 = C_1 + \Delta C = 0,655 \text{ мкФ}.$$

220. Ёмкость конденсатора, включённого в цепь переменного тока равна  $C = 6$  мкФ. Уравнение колебаний напряжения на конденсаторе имеет вид:

$$u(t) = 50 \cos 10^3 t;$$

Определить амплитуду силы тока, если все величины в уравнении выражены в СИ.

#### Решение

1. Циклическая частота колебаний равна  $\omega = 10^3$  рад/с, что даёт возможность определить сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{\omega C};$$

2. Амплитудное значение силы тока

$$i_m = \frac{u_m}{X_C} = u_m \omega C = 50 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 0,3 \text{ А};$$

221. Напряжение на обкладках конденсатора ёмкостью  $C = 10$  мкФ, включенного в идеальный колебательный контур изменяется в соответствии с законом  $u(t) = 100 \cos 10^3 \pi t$ . Определить индуктивность катушки, период колебаний и закон изменения силы тока через индуктивность.

#### Решение

1. В данном случае циклическая частота собственных колебаний контура –  $\omega_0 = 10^3 \pi$  рад/с, поэтому период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{6,28}{10^3 \cdot 3,14} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

2. Индуктивность катушки определим, воспользовавшись уравнением Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \quad L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 9,87 \cdot 10^{-5}} \cong 5 \text{ мГн}.$$

3. Закон изменения силы тока определится уравнением

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = -CU_0 \omega \sin \omega t = 10^{-5} \cdot 100 \sin 10^3 \pi t,$$

$$i(t) = -10^{-3} \sin 10^3 \pi t.$$

222. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и конденсатора. В контуре возникают гармонические электромагнитные колебания с периодом  $T = 4$  мс. В начальный момент времени заряд конденсатора максимален и равен  $q_m = 10 \cdot 10^{-6}$  Кл. Каков будет заряд конденсатора через  $\tau = 2$  мс?

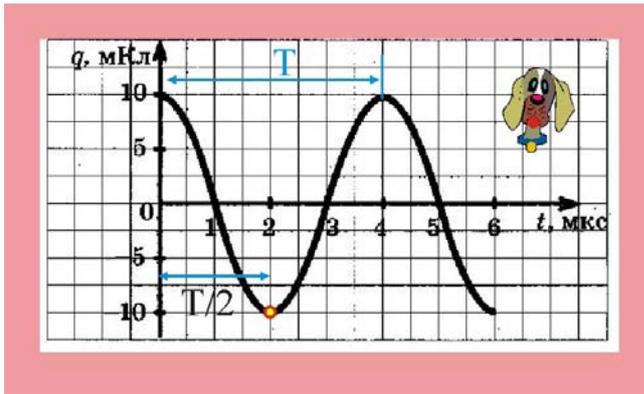


Рис. 222. Заряд конденсатора

### Решение

1. Как видно из приведенного графика косинусоидальных колебаний заряда на конденсаторе, через четверть периода заряд поменяет свой знак и через половину периода достигнет максимального отрицательного значения.

223. Как изменится период собственных электромагнитных колебаний в контуре, если переключатель перевести из положения 1 в положение 2?

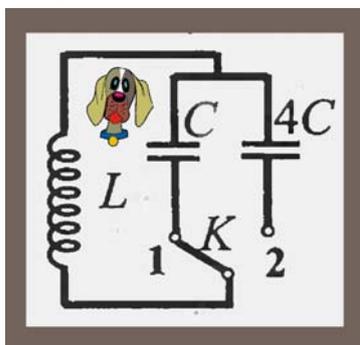


Рис. 223. Изменение ёмкости

### Решение

1. Период собственных незатухающих колебаний в контуре, состоящем из конденсатора и катушки индуктивности, определяется уравнением Томсона

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi\sqrt{LC}; \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{4LC}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = 2;$$

224. Каким образом происходят колебания вектора напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  и вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  в электромагнитной волне?

### Решение

1. Волновые уравнения для электромагнитной волны, распространяющейся со скоростью света  $c$  для вакуума или воздуха ( $\mu_0 = \epsilon_0 = 1$ ) можно представить следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \end{aligned} \right\}$$

2. Всякая зависимость, удовлетворяющая этим уравнениям должна описывать волновой процесс. Напряжённости магнитного и электрического полей являются функциями времени и координат. Наличие в уравнениях скорости света, которая в данном случае должна рассматриваться как фазовая скорость электромагнитных волн.

3. Решениями уравнений в случае плоской волны будут являться функция, зависящая от времени и координаты

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ \vec{H} &= H_m \sin(\omega t - kx). \end{aligned} \right\}$$

4. На рис. 224 приведено, «остановленное» во времени распределение напряжённостей Электрического и магнитного поля для плоской волны. Направление волны и векторы напряжённостей образуют правовинтовую систему.

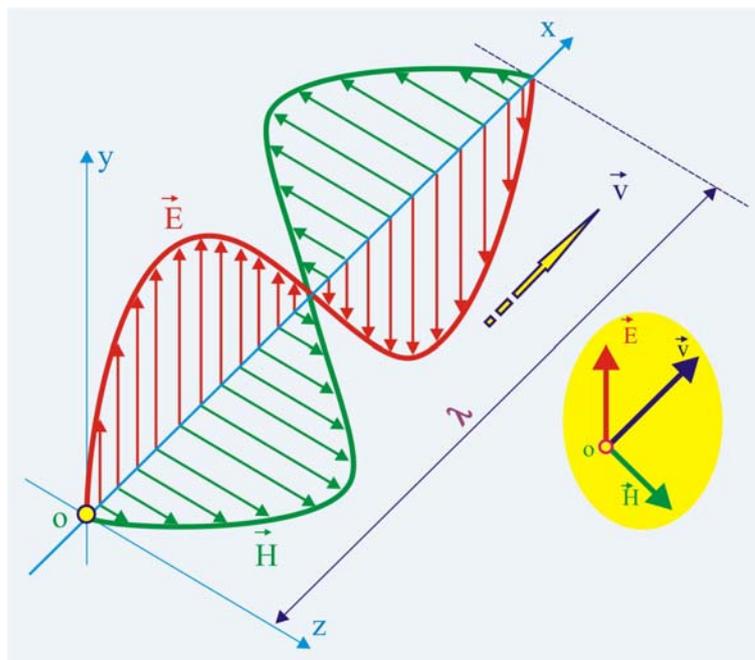


Рис. 224. Изменение  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  во времени и пространстве

5. Колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне протекают с одинаковой фазой, т.е. максимумы вектора напряжённости электрического поля и магнитного поля наблюдаются в одни и те же моменты времени, т.е.

$$E_m \sqrt{\epsilon \epsilon_0} = H_m \sqrt{\mu \mu_0} .$$

6. Скорость электромагнитных волн в среде будет определяться как

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}} \cong 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

225. Для изучения электромагнитных волн высокой частоты используют транзисторные генераторы. Какую функцию выполняет в этой схеме транзистор?

### Решение

1. Транзистор включён через индуктивность связи таким образом, что он осуществляет периодическое подключение колебательного контура к источнику питания, с целью компенсации затухания.

226. Найти отношения амплитудных значений сил тока  $I_m$ , напряжений  $U_m$ , электрических  $W_{\text{Вм}}$  и магнитных  $W_{\text{Em}}$  мощностей, если начальный заряд  $q_m$  на конденсаторе, включенном в идеальный колебательный контур, увеличился в 10 раз.

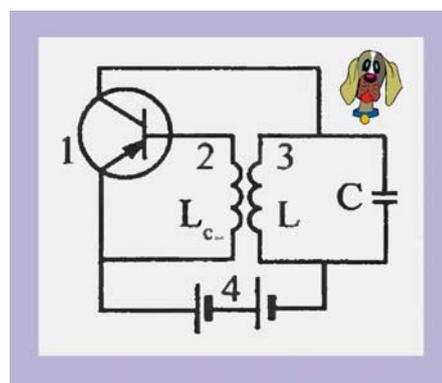


Рис. 225. Транзисторный генератор

### Решение

1. Предположим, что электрический заряд в колебательном контуре изменяется по закону

$$q = q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

в этом случае уравнение силы тока представится следующим образом

$$i = \frac{dq}{dt} = \omega_0 q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = i_m \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $\omega_0$  – циклическая частота собственных колебаний в электрическом контуре.

2. Образует систему уравнений для амплитудных значений сил токов, из которых найдём их отношение

$$\left. \begin{array}{l} i_{m1} = q_{m1} \omega_0; \\ i_{m2} = 10 q_{m1} \omega_0; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{i_{m2}}{i_{m1}} = \frac{q_{m2}}{q_{m1}} = 10.$$

3. Взаимосвязь между зарядом и напряжением установим из следующих соображений

$$C = \frac{q_{m1}}{U_{m1}}; \quad C = \frac{q_{m2}}{U_{m2}}; \quad \Rightarrow \quad \frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{q_{m2}}{q_{m1}} = 10.$$

4. Ввиду идеальности колебательного контура для энергии можно записать следующие соотношения

$$W_{Bm} = W_{Em} = \frac{q_m^2}{2C}; \quad \Rightarrow \quad \frac{W_{Bm(2)}}{W_{Bm(1)}} = \frac{W_{Em(2)}}{W_{Em(1)}} = \left( \frac{q_{m(2)}}{q_{m(1)}} \right)^2 = 100.$$


---

## 10. Геометрическая оптика

227. Источник света неправильной формы S отражается в плоском зеркале ab. На каком рисунке верно показано изображение S<sub>1</sub> источника в зеркале?

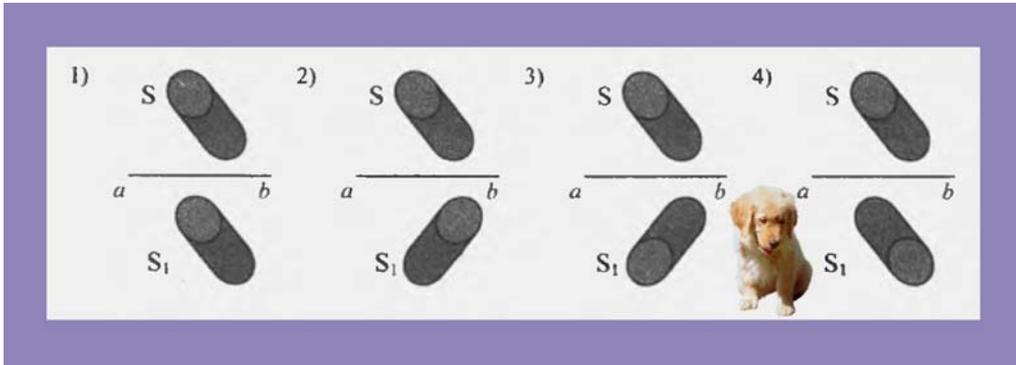


Рис. 227. 1. Изображение предмета в плоском зеркале

### Решение

1. Изображение источников света в зеркале получаются мнимыми, потому что строятся на пересечении продолжений отражённых лучей.

2. В соответствии с законом отражения падающие и отражённые лучи лежат в одной плоскости и угол падения равен углу отражения. Как принято в оптике, углы отсчитываются от нормали к отражающей поверхности. Расстояние от светящейся точки до поверхности зеркала равно расстоянию от изображения до зеркала.

3. Перечисленным требованиям удовлетворяет рисунок №3.

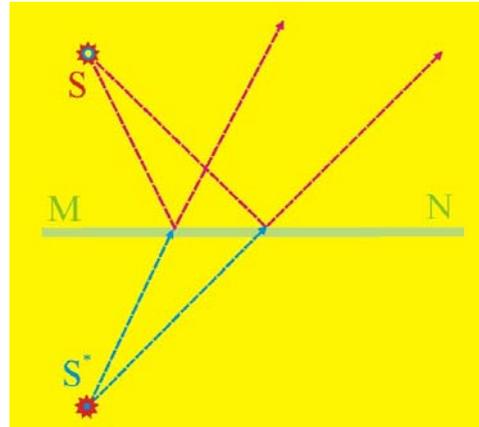


Рис. 227.2 Изображение точечного источника света в плоское зеркало

228. К потолку комнаты высотой  $H = 3\text{ м}$  прикреплена люминесцентная лампа длиной  $L = 1,5\text{ м}$ . На высоте  $b = 1,5\text{ м}$  от пола параллельно ему расположен круглый непрозрачный диск диаметром  $2r = 1,5\text{ м}$ . Центр лампы и центр диска лежат на одной вертикали. Определить минимальный размер тени диска на полу.

### Решение

1. На основании закона прямолинейного распространения света можно ввести в рассмотрение подобные треугольники, образованные лучами исходящими от лампы и падающими на пол

$$\triangle ABC \sim \triangle ADK,$$

из чего следует:

$$\frac{2H}{d} = \frac{b}{r}; \quad d = \frac{2Hr}{b} = \frac{6 \cdot 0,75}{1,5} = 3\text{ м}.$$

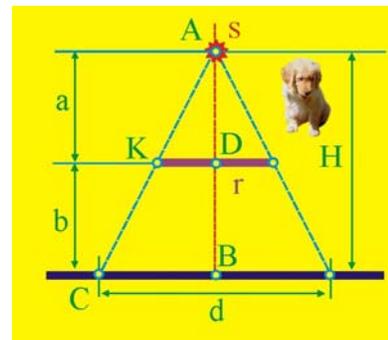


Рис. 228. Прямолинейное распространение света

229. На плоское зеркало  $mn$  падает под углом  $\alpha = 25^\circ$  световой луч. На какой угол повернется отражённый луч, если зеркало повернуть в вертикальной плоскости на угол  $\beta = 10^\circ$ ?

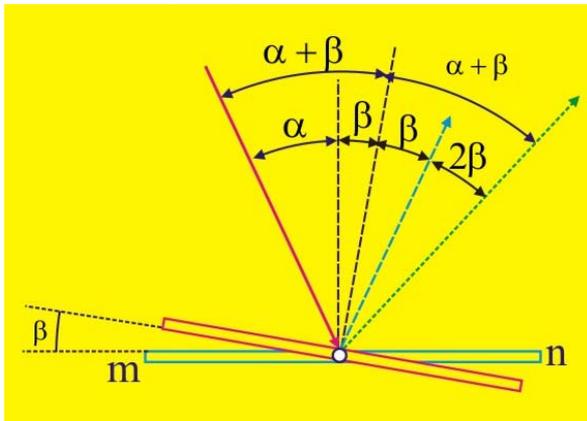


Рис. 229. Поворот зеркала

Решение

1. При повороте в вертикальной плоскости зеркала на угол  $\beta = 10^\circ$ , на такой же угол повернется и перпендикуляр к плоскости зеркала в точке падения луча.

2. Как видно из построения, выполненного на основе закона отражения луча, отражённый луч при повороте зеркала изменит своё направление по сравнению с первоначальным на угол  $\gamma = 2\beta = 20^\circ$ .

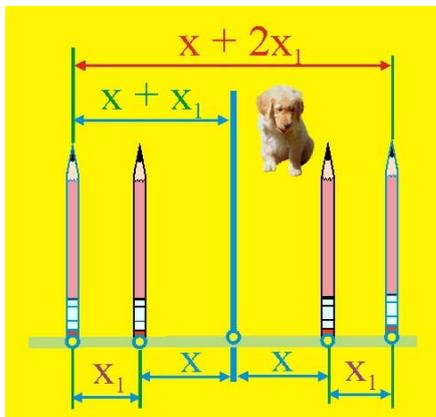


Рис. 230. Изображение карандаша  
 $2x_1 = 70$  см.

230. Расстояние от карандаша до его изображения в плоском зеркале было равно  $x = 50$  см. Карандаш отодвинули от зеркала на расстояние  $x_1 = 10$  см. Каким стало расстояние между карандашом и его изображением?

Решение

1. Как видно из построения, приведенного на рис. 230 при перемещении карандаша на расстояние  $x_1$  от зеркала, его изображение тоже отодвинется от зеркала на расстояние  $x_1$ , таким образом, расстояние между новым положением предмета и его изображения станет равным  $x +$

231. Установите соответствие между типом изображения в собирающей тонкой линзе с фокусным расстоянием  $F$  и расстоянием  $A$  от источника света до линзы.

РАССТОЯНИЕ $A$ ОТ ЛИНЗЫ ДО ИСТОЧНИКА		ТИП ИЗОБРАЖЕНИЯ
А) $0,5F$		1) уменьшенное, действительное
Б) $1,5F$		2) увеличенное, действительное
В) $3,0F$		3) увеличенное, мнимое

Рис. 231.1. Соответствие между типами изображений

**Решение**

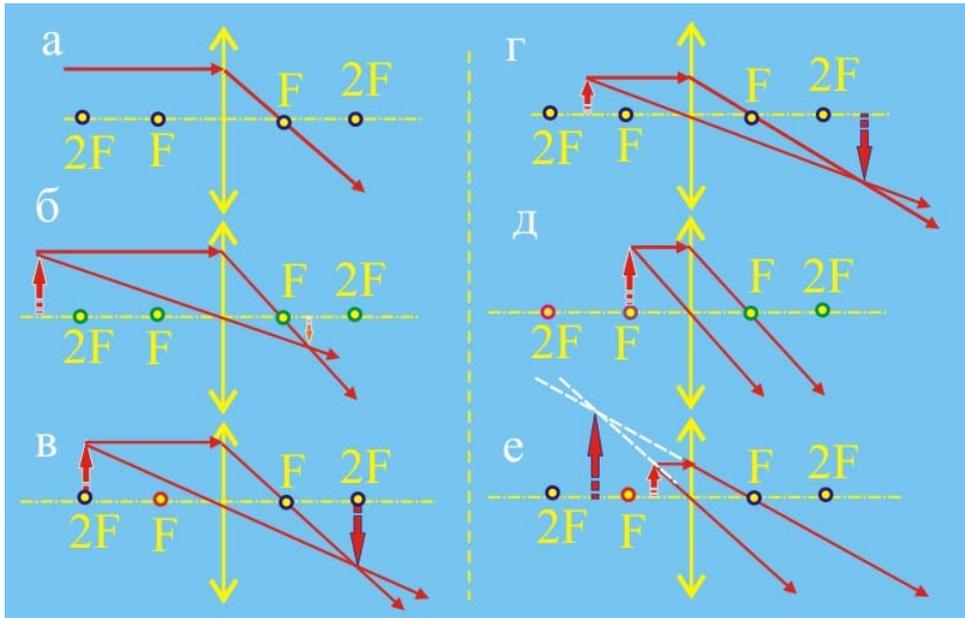


Рис. 231.2. Построение изображений в тонкой собирающей линзе

А	Б	В
3	2	1

232. Луч АВ преломляется в точке В на границе раздела двух сред с показателями преломления  $n_1 > n_2$ . Определить, как изменится направление луча ВС при увеличении показателя преломления  $n_2$  и при сохранении условия на границе сред  $n_1 > n_2$ .

**Решение**

1. Из закона преломления света следует:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \sin \alpha n_1 = \sin \gamma n_2;$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha n_1}{n_2};$$

2. При увеличении величины  $n_2$  при сохранении угла падения  $\alpha$  угол преломления должен уменьшаться, т.е. – приближаться к вертикали.

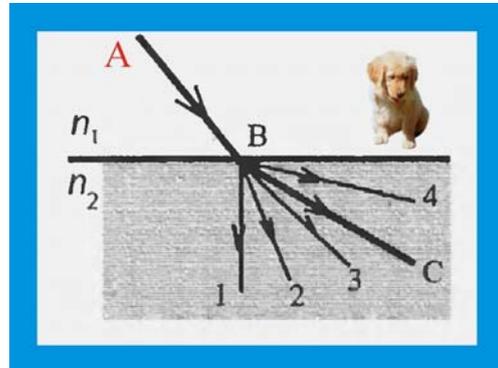


Рис. 232. Преломление луча

233. На основании хода лучей определить оптическую силу линзы.

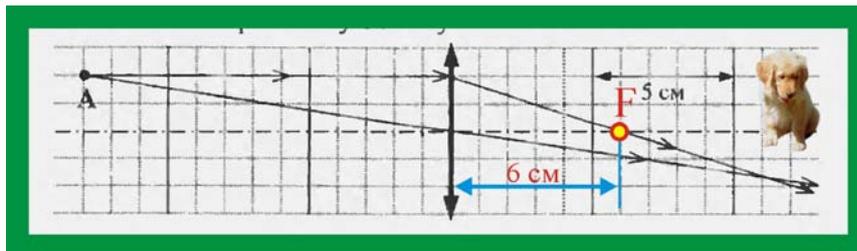


Рис. 233. Оптическая сила тонкой собирающей линзы

**Решение**

1. По заданному ходу лучей определим фокусное расстояние линзы: луч параллельный главной оптической оси всегда проходит через фокус линзы, значит  $F = 6$  см.

2. Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-2}} \cong 16,7 \text{ диоптрии};$$

234. Синус предельного угла полного внутреннего отражения на границе стекло – воздух равен  $8/13$ . Какова скорость света в стекле?

### Решение

1. Угол полного внутреннего отражения определяется как

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v}{c}; \Rightarrow v = \sin \alpha_{\text{пр}} c \cong 1,85 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

235. Задан ход лучей через плоскопараллельную пластинку. Определить показатель преломления материала пластинки.

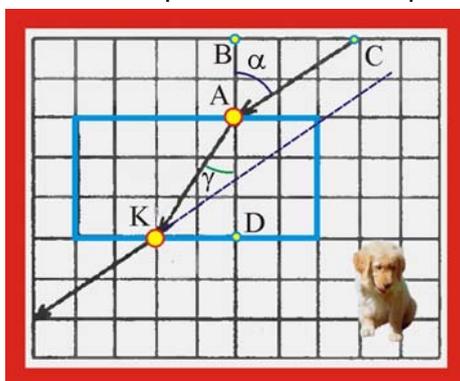


Рис. 235. Прохождение светового луча через пластинку

### Решение

1. Закон преломления света на границе раздела двух сред

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}; \quad n_1 = 1;$$

2. Углы падения и преломления определим из прямоугольных треугольников  $\triangle ABC$  и  $\triangle AKD$

$$\alpha \cong \arctg \frac{3}{2} \cong 56,3^\circ; \quad \gamma \cong \arctg \frac{2}{3} \cong 33,8^\circ;$$

3. Подставим найденные углы в уравнение закона преломления

$$n_2 \cong \frac{\sin 56,3^\circ}{\sin 33,8^\circ} \cong 1,478;$$

236. Исследовались возможные способы наблюдения полного внутреннего отражения. В первом случае узкий пучок света направлялся из воздуха в стекло (рис. 1), во втором случае – из стекла в воздух. Показатель преломления стекла в обоих случаях равен  $n$ . При каких углах падения возможно наблюдать это явление.

### Решение

1. Полное внутренне отражение наблюдается при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1};$$

2. Случай, приведенный на рис. 1 невозможен т.к.  $\sin \alpha < 1$ .

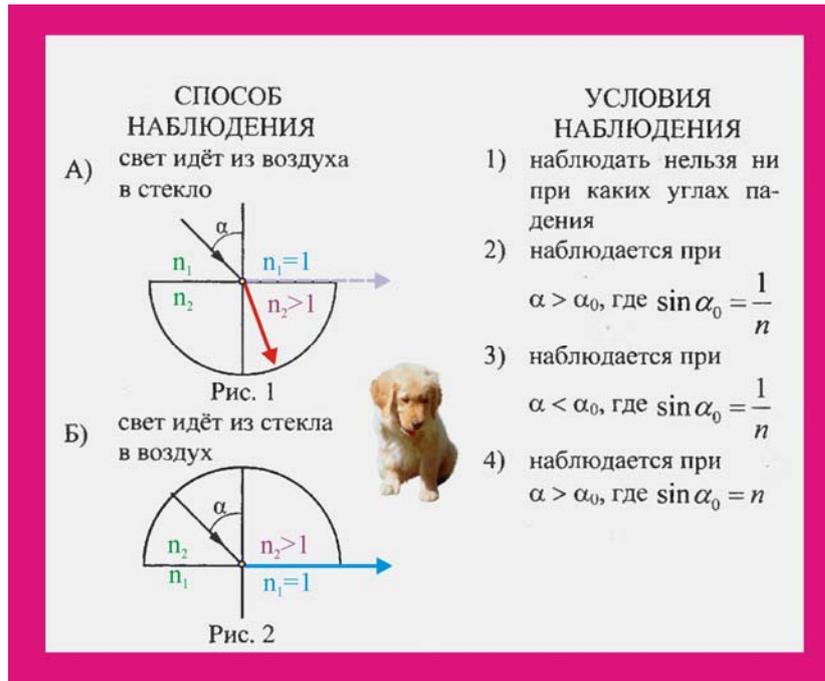


Рис. 236. Полное внутреннее отражение

7. Во втором случае луч падает из среды более оптически плотной в среду менее оптически плотную

$$\sin \alpha_{\text{Пр}} = \frac{n_1}{n_2} \cong \frac{1}{1,5} \cong 0,67; \quad \alpha_{\text{Пр}} \cong 42^\circ,$$

т.е. соответствует случаю  $\alpha > \alpha_{\text{Пр}}$ .

237. От экрана до мобильного телефона 30 см. Ровно посередине между телефоном и экраном находится лупа. Когда телефон зазвонил, на экране возникло перевёрнутое изображение фамилии звонящего абонента. Каково фокусное расстояние линзы?

### Решение

1. Перевёрнутое действительное изображение предмета в его натуральную величину получается в случае расположения от линзы на двойном фокусном расстоянии (рис. 237)

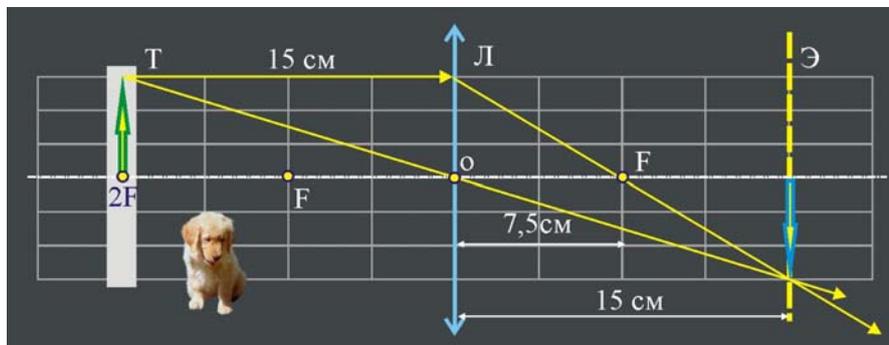


Рис. 237. Изображение предмета в собирающей линзе

2. Фокусное расстояние тонкой собирающей линзы составляет  $F = 7,5$  см.

238. Предмет расположен от собирающей линзы на расстоянии большем двойного фокусного изображения. Каким будет изображение предмета?

**Решение**

1. Изображение предмета будет действительным, уменьшенным и перевернутым (рис. 238)

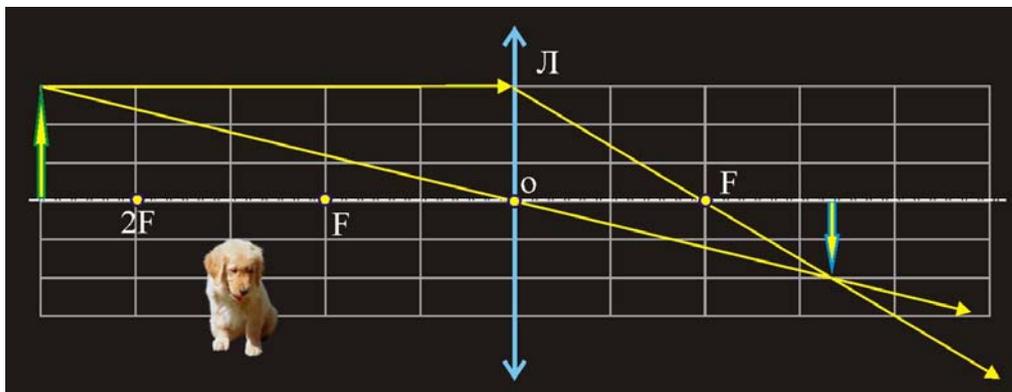


Рис. 238. Изображение предмета, расположенного за двойным фокусным расстоянием

239. Где находится изображение светящейся точки S, создаваемое тонкой собирающей линзой?

**Решение**

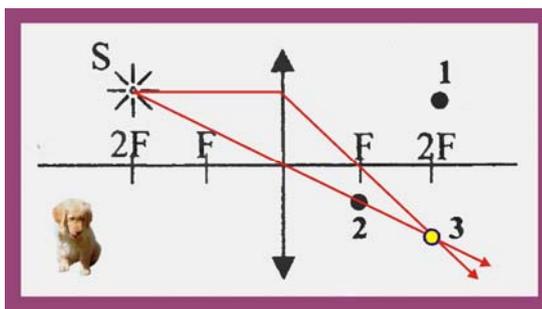


Рис. 239. Изображение светящейся точки

240. Получить изображение точечного источника, расположенного на главной оптической оси тонкой собирающей линзы за двойным фокусным расстоянием.

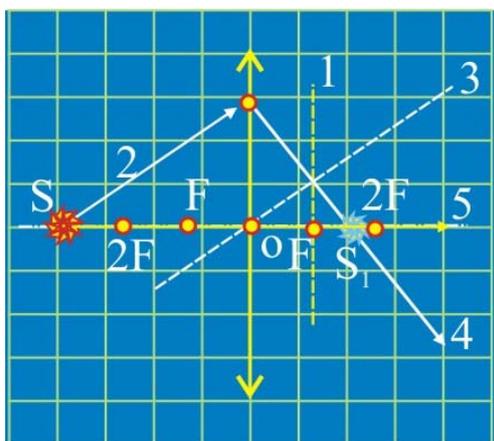


Рис. 15.154. Источник на главной оптической оси линзы

**Решение**

1. Построим фокальную плоскость 1.
2. Выбираем произвольный луч 2.
3. Через оптический центр линзы проводим побочную оптическую ось 3 параллельную выбранному направлению луча 2.
4. Луч 2 после преломления в линзе должен пройти через точку пересечения фокальной плоскости и побочной оптической оси. Через точку пересечения фокальной плоскости и вспомогательной оси проводим луч 4, который укажет положение изображения источника. В качестве второго луча используем луч 5, идущий вдоль главной оси и не испытывающий преломления ввиду нормального падения.

241. Собирающая линза даёт чёткое изображение пламени свечи на экране, если свеча располагается на расстоянии 0,2 м, а экран на расстоянии 0,5 м от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.

**Решение**

1. В данном случае:  $d = 0,2$  м,  $f = 0,5$  м, т.е известны расстояния от предмета до линзы и от изображения до линзы. На основании формулы тонкой линзы имеем

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}; \quad \frac{d+f}{df} = \frac{1}{F}; \quad F = \frac{df}{d+f} = \frac{0,1}{0,7} \cong 0,14\text{м};$$

242. Предмет высотой  $H = 6$  см расположен на главной оптической оси на расстоянии  $d = 30$  см от её оптического центра. Оптическая сила линзы равна  $D = 5$  диоптрий. Найти высоту изображения.

**Решение**

1. Определим фокусное расстояние линзы

$$D = \frac{1}{F}; \quad \Rightarrow F = \frac{1}{D} = 0,2\text{м};$$

2. Определим расстояние  $f$  от изображения до линзы

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}; \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{0,2} - \frac{1}{0,3} = 5 - 3,3 = 1,7; \quad f = \frac{1}{1,7} \cong 0,6\text{м};$$

3. Воспользуемся далее формулой увеличения линзы

$$k = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}; \quad h = \frac{Hf}{d} = \frac{0,06 \cdot 0,6}{0,3} = 0,12\text{м};$$

243. Расстояние наилучшего зрения для конкретного человека равно 40 см. На каком расстоянии от зеркала должен располагаться человек, чтобы наилучшим образом рассматривать своё изображение?

**Решение**

1. Человек наблюдает в зеркале мнимое своё изображение, которое располагается на таком же расстоянии, как и сам предмет. Поэтому расстояние от человека до изображения должно соответствовать его оптимальной резкости, т.е. он должен расположиться он зеркала на расстоянии  $x = 20$  см.

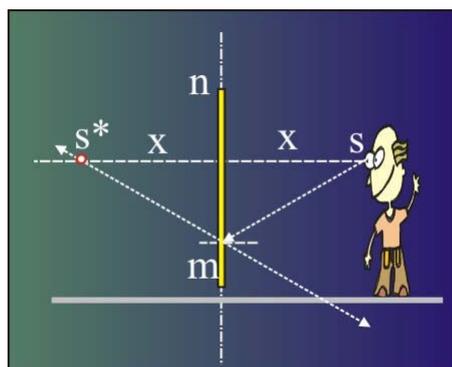


Рис. 243. Изображение в зеркале

244. Какой из образов 1 – 4 служит изображением предмета АВ в тонкой линзе с фокусным расстоянием  $F$ ?

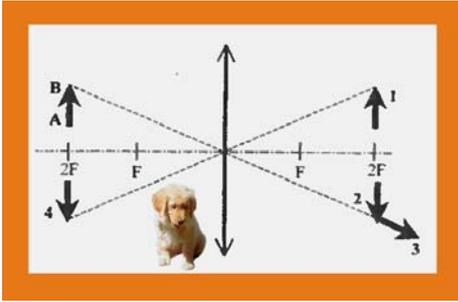


Рис. 244. Изображения в линзе

**Решение**

1. Предмет, расположенный на двойном фокусном расстоянии от плоскости тонкой собирающей линзы (рис. 231.2) имеет обратное действительное изображение, располагающееся на расстоянии двойного фокуса справа от линзы, т.е. образ 2 соответствует предмету АВ

245. Дан ход лучей через линзу. Определить, для какого дефекта зрения (близорукость или дальнозоркость) можно использовать в очках.

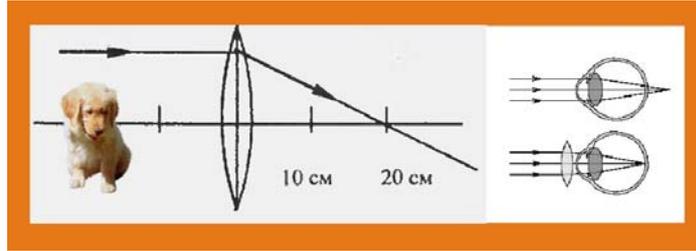


Рис. 245. Оптическая сила линзы

**Решение**

1. Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ дптр};$$

2. Линзу можно использовать при дальнозоркости +5 дптр, при близорукости используются вогнутые линзы.

246. Установить соответствие между оптическим прибором и типом изображения, получаемым с его помощью.

**Решение**

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	ТИП ИЗОБРАЖЕНИЯ
А) Мультимедиа проектор	1) уменьшенное, мнимое
Б) Цифровой фотоаппарат	2) увеличенное, действительное
В) Дверной глазок	3) уменьшенное, действительное

Рис. 246. Соответствие между устройствами и изображениями

А	Б	В
2	3	1

247. Удалённый небольшой светящийся объект приближают вдоль оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F$ . Установить соответствие между диапазоном, в котором меняется расстояние  $d$  от предмета до линзы и характером изменения размера чёткого изображения объекта, получаемого всякий раз на экране по другую от предмета стороне линзы.

Расстояние $a$ от предмета до линзы	Размер изображения
А) $10F < a < 3F$	1) увеличивается
Б) $3F < a < 2F$	2) уменьшается
В) $2F < a < F$	3) не меняется



Рис. 247.1. Соответствие расстояний от предмета до линзы с масштабами изображений

### Решение

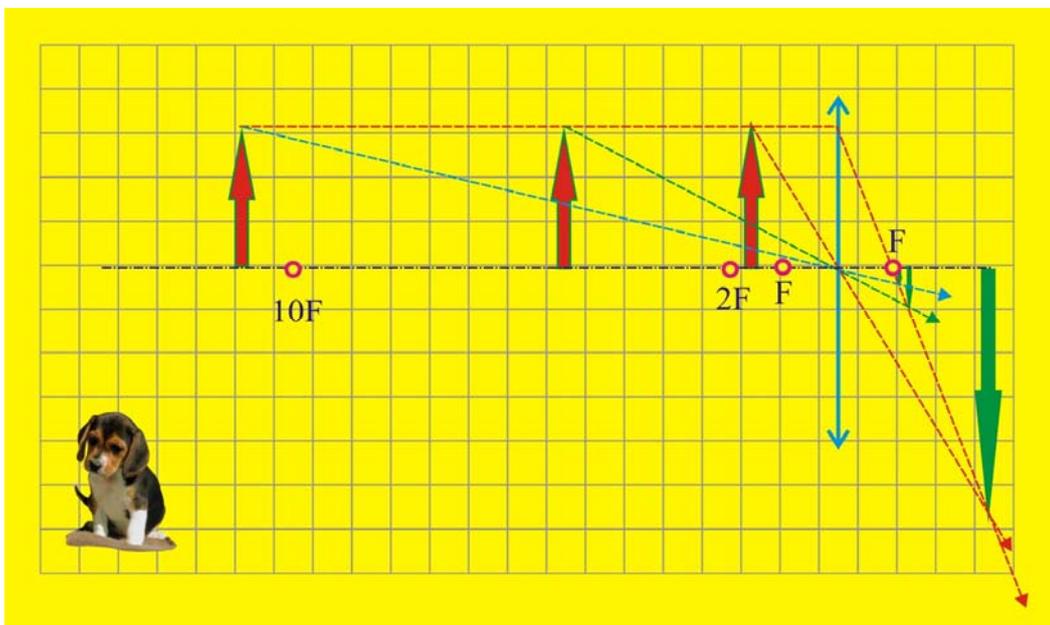


Рис. 247 2. Изменение масштаба изображения

1. Построение показывает, что приближении предмета к линзе будет сопровождаться увеличением его изображения.

А	Б	В
1	1	1

## 11. Волновая оптика

248. Считается, что при распространении света в вакууме в виде электромагнитной волны в пространстве распространяются:

- 1) только колебания напряжённости электрического поля;
- 2) только колебания индукции магнитного поля;
- 3) колебания напряжённости электрического поля и индукции (напряжённости) магнитного поля;
- 4) колебания невидимой среды – эфира?

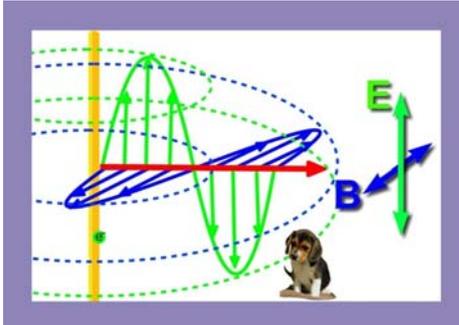


Рис. 248. Электромагнитная волна

### Решение

1. В пространстве, например, вблизи проводника с переменным током, или в окрестностях Солнца, распространяются поперечные электромагнитные волны, представляющие собой движение в пространстве электрических и магнитных колебаний

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ \vec{B} &= B_m \sin(\omega t - kx). \end{aligned} \right\}$$

249. Расположить в порядке возрастания длины волны электромагнитные излучения разной природы:

- I) Инфракрасное излучение Солнца;
- II) Рентгеновское излучение;
- III) Излучение СВЧ – печей;
- IV) Ультрафиолетовое излучение.

### Решение

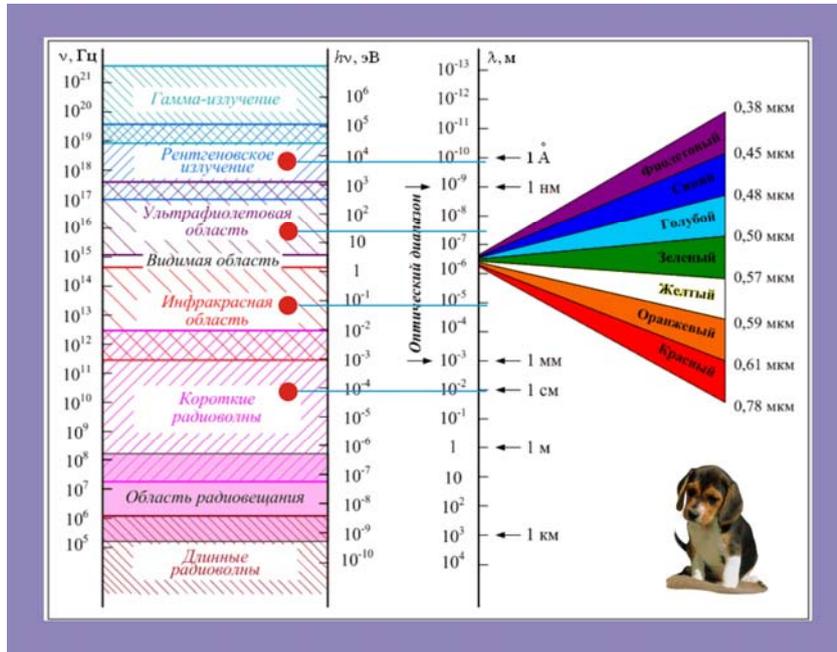


Рис. 249. Шкала электромагнитных волн

250. На дифракционную решётку с периодом  $d = 0,004$  мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Наблюдается  $m = 19$  дифракционных максимумов. Определить длину световой волны.

### Решение

1. Уравнение максимумов для дифракционной решётки

$$d \sin \varphi = m\lambda,$$

где  $d$  – период (постоянная) данной дифракционной решётки,  $\varphi$  – угол падения волны на решётку,  $m$  – порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  – длина волны падающего света.

2. В данном случае волна падает на решётку нормально, т.е.  $\sin \varphi = 1$

$$d = m\lambda; \Rightarrow \lambda = \frac{d}{m} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{9} \cong 444 \text{ нм};$$

251. В некотором спектральном диапазоне угол преломления лучей на границе раздела воздух – стекло падает с увеличением частоты излучения. Ход лучей для трёх основных цветов при падении белого света из воздуха на границу раздела приведен на верхнем фрагменте рис. 251. Каким цифрам соответствуют основные цвета: синий, зелёный, красный и синий?

### Решение

1. Угол преломления при переходе из одной среды в другую, зависит от длины волны (частоты) падающих волн. Наибольшее преломление испытывают волны с наименьшей длиной. Цифра 1 соответствует синему цвету, цифра 2 – зелёному, цифра 3 – красному цвету.

252. Какое из перечисленных ниже свойств волн является специфическим для электромагнитных волн, не являясь общим свойством волн любой природы?

- 1) интерференция;
- 2) дифракция;
- 3) преломление;
- 4) поляризация?

### Решение

1. Электромагнитная волна является поперечной, потому что периодические возмущения электрического и магнитного поля происходят в направлениях, перпендикулярных направлению распространения.

2. При нарушении симметрии распределения возмущений в поперечной волне возникает явление поляризации. В продольных волнах такое явление не возникает, потому что в них возмущения совпадают с направлением распространения.

3. Причинами поляризации (несимметричности) колебаний векторов электрического и магнитного поля могут быть: не симметрия источника излучения, анизотропия

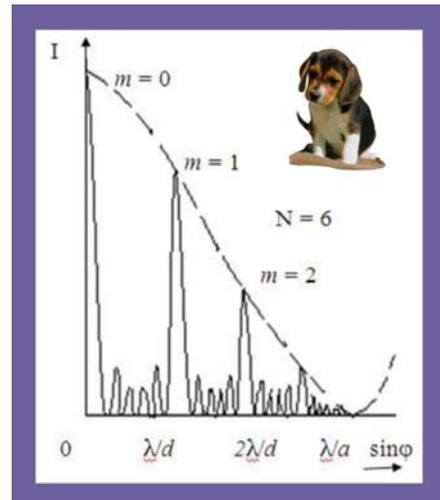


Рис. 250. Дифракционная картинка

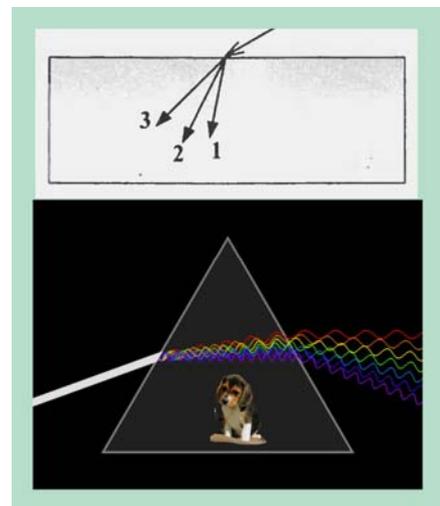


Рис. 251. Преломление волн

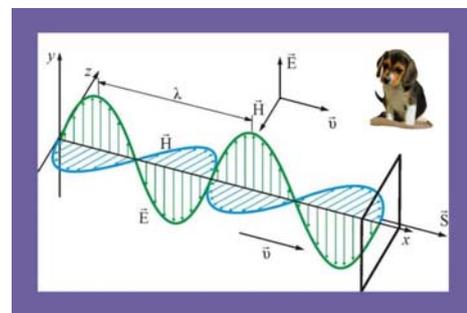


Рис. 252. Симметричная волна

среды(зависимость свойств от направления), а так же преломление и отражение на границе раздела сред.

---

253. Что в обыденной жизни легче наблюдать: дифракцию звуковых или световых волн?

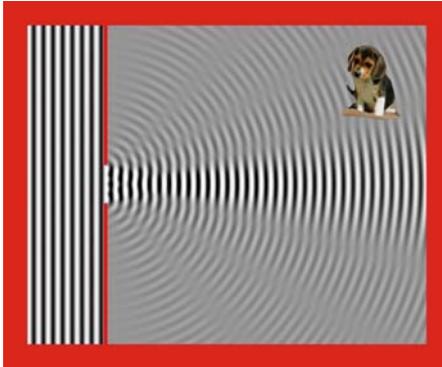


Рис. 253. Дифракция волн

длины от 760 нм до 380 нм, что требует привлечения специальных устройств как для создания препятствий соизмеримых с длиной волны, так и приборов наблюдения эффектов их взаимодействия с препятствиями.

---

### Решение

1. Дифракция в общем случае представляет собой комплекс явлений, связанных с распространением волн в средах с неоднородностями, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Простейшим случаем дифракции является явление огибания препятствий.

2. Звуковые волны лежат в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц что соответствует диапазону длин волн от 17,5 м до  $17,5 \cdot 10^{-3}$  м.

3. Световые волны видимого диапазона имеют

254. На плоскую непрозрачную пластинку с двумя узкими параллельными щелями падает по нормали плоская монохроматическая волна из зеленой части видимого спектра. За пластиной на параллельном ей экране наблюдается интерференционная картина. Что произойдет с картиной, если использовать свет из красной части видимого спектра:

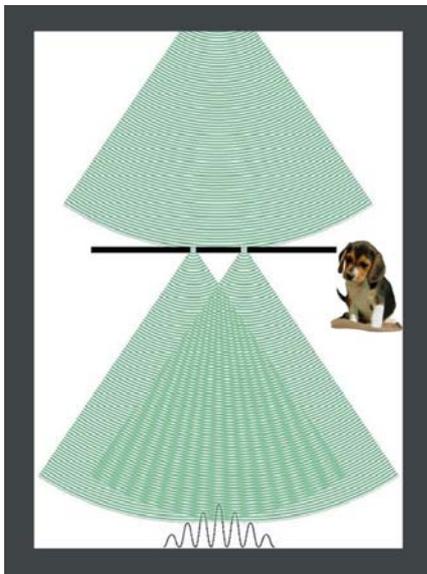


Рис. 254. Интерференция на щелях

- 1) расстояние между интерференционными полосами увеличится;
- 2) расстояние между интерференционными полосами уменьшится;
- 3) расстояние между интерференционными полосами не изменится;
- 4) интерференционная картина исчезнет?

### Решение

1. Расстояние от центра картинке до интерференционного максимума для двух щелей (впервые это явление наблюдал Томас Юнг) определяется уравнением:

$$x_{\max} = \pm m \frac{\ell}{d} \lambda,$$

где  $m$  – порядок максимума,  $\ell$  – расстояние от щелей до экрана,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения.

2. У световой волны из красного диапазона длина волны больше, чем у зелёного диапазона, поэтому расстояния между интерференционными максимумами увеличатся.

---

255. Лазерный луч красного цвета падает перпендикулярно на дифракционную решётку. На линии ABC экрана наблюдается серия ярких красных пятен. Какие изменения произойдут в расположении пятен, если красный лазер заменить на зелёный?

### Решение

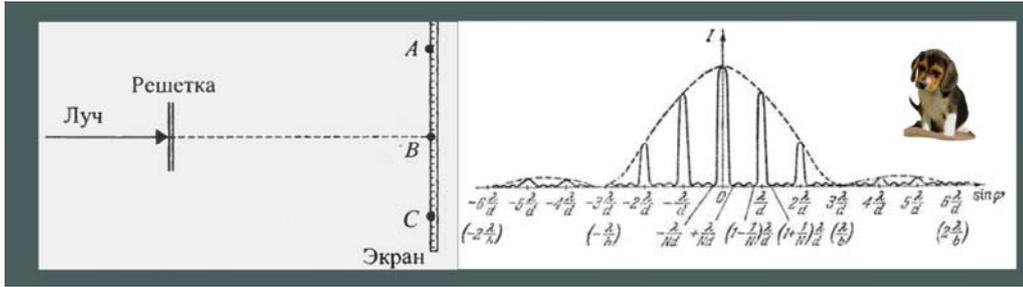


Рис. 255. Интерференция лазерного луча на решётке

1. На основании уравнения, описывающего расположение интерференционных максимумов

$$x_{\max} = \pm m \frac{\ell}{d} \lambda,$$

можно заключить, что при уменьшении длины волны при использовании лазера зелёного света ( $\lambda_{\text{кр}} > \lambda_3$ ) положение центрального пятна не изменится, а все остальные максимумы (световые пятна) приблизятся к центру, картинка стянется.

256. Луч лазера направляется перпендикулярно плоскости дифракционной решётки в первом случае с периодом  $d$ , а во втором случае с периодом  $2d$ . Как изменится расстояние между центральным и первым дифракционным максимумом при замене первой решётки на вторую?

### Решение

1. Увеличение периода дифракционной решётки равносильно сокращению числа щелей на единицу длины, т.к.

$$x_{\max} = \pm m \frac{\ell}{d} \lambda, \quad m=1;$$

$$x_{\max} = \pm \frac{\ell \lambda}{d},$$

увеличение  $d$  приведёт к приближению первого максимума к центральному максимуму.

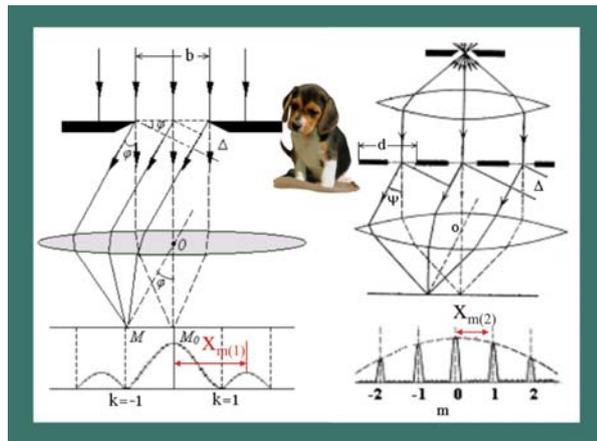


Рис. 256. Дифракционные максимумы

257. Если за непрозрачным диском, освещённым ярким источником света небольшого размера, поставить фотоплёнку, исключив попадание на неё отражённых лучей, то при проявлении её после большой выдержки в центре негатива можно обнаружить светлое пятно. Какое явление обеспечивает такой эффект?

### Решение

1. Описанная картина становится возможной вследствие дифракции световых волн на кромке диска. Это явление впервые наблюдал



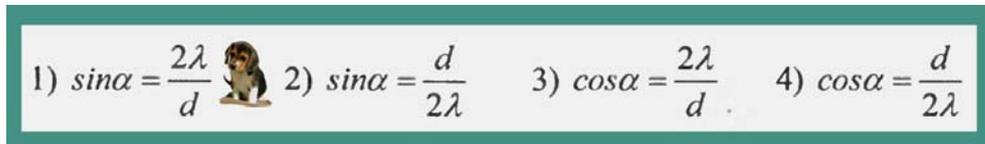
Рис. 257. Дифракция на диске

Франческо Гримальди.

2. Явление дифракции заключается в изменении направления распространения волн при встрече с препятствием. Чаще всего при этом подразумевают интерференционные процессы, сопровождающие огибание препятствий. Строго говоря, явление дифракции сопровождается буквально все волновые процессы, являясь, по сути, визитной карточкой этого типа движения материи. Однако наблюдение дифракционных волновых картин становится возможным только в том случае, когда характерные размеры препятствия соизмеримы с длиной волны или меньше этой длины. Явление дифракции зарегистрировано для всего диапазона световых и упругих волн, от инфразвукового диапазона до волн в гиперзвуковой области, включая акустические, гравитационные и сейсмические волны.

---

258. Дифракционная решётка с периодом  $d$  освещается нормально падающим световым пучком с длиной волны  $\lambda$ . Какое из приведённых выражений определяет угол  $\alpha$ , под которым наблюдается второй главный максимум?



1)  $\sin \alpha = \frac{2\lambda}{d}$   2)  $\sin \alpha = \frac{d}{2\lambda}$  3)  $\cos \alpha = \frac{2\lambda}{d}$  4)  $\cos \alpha = \frac{d}{2\lambda}$

Рис. 258. Уравнения угла наблюдения второго главного максимума

#### Решение

1. Положение второго интерференционного максимума определяется уравнением:

$$d \sin \alpha = 2\lambda; \Rightarrow \sin \alpha = \frac{2\lambda}{d};$$

---

259. Заданы импульсы двух фотонов  $p_1 = 4 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с и  $p_2 = 1 \cdot 10^{-21}$  кг·м/с. В каком отношении находятся соответствующие длины волн?

#### Решение

1. Запишем уравнения импульсов и найдём отношение соответствующих длин волн

$$p_{f(1)} = m_{f(1)} c = \frac{h}{c\lambda_1} c = \frac{h}{\lambda_1}; \quad p_{f(2)} = m_{f(2)} c = \frac{h}{c\lambda_2} c = \frac{h}{\lambda_2};$$
$$\frac{p_{f(2)}}{p_{f(1)}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1 \cdot 10^{-21}}{4 \cdot 10^{-22}} = 2,5;$$

---

260. Свет переходит из воздуха в стекло с показателем  $n \cong 1,5$ . Как изменятся при этом скорость света и его частота?

#### Решение

1. Показатель преломления воздуха с достаточной степенью точности  $n_0 = 1$ , в то время как у отдельных сортов стекла он может достигать  $n \cong 1,58$ . По определению, абсолютный показатель преломления при прохождении световой волны из одной среды в другую равен:

$$n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2},$$

для случая перехода волны из воздуха в стекло

$$\frac{c}{v} = n; \Rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. При переходе из одной среды в другую частота волны изменяться не будет.

261. . На узкую щель шириной  $a = 20$  мкм нормально падает параллельный пучок света ( $\lambda = 500$  нм). Найти ширину  $A$  изображения щели на экране, удалённом от неё на расстояние  $L = 1$  м. В качестве ширины изображения принять расстояние между первыми дифракционными минимумами, по обе стороны от главного максимума освещённости.

**Решение**

1. Как видно из рис. 17.60

$$\frac{A}{2} = L \operatorname{tg} \varphi;$$

2. При достаточной малости угла  $\varphi$ , а этому есть основания при сравнении  $a$  и  $L$ , можно тангенс заменить синусом

$$\operatorname{tg} \varphi \cong \sin \varphi; \Rightarrow A = 2L \sin \varphi;$$

3. Запишем условие максимума интенсивности  $I_{\max}$  и выразим  $\sin \varphi$  при  $k = 1$

$$a \sin \varphi = k\lambda; \Rightarrow \sin \varphi = \frac{A}{2L};$$

4. С другой стороны,

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}; \Rightarrow A = \frac{2L\lambda}{a} \cong 0,05 \text{ м};$$

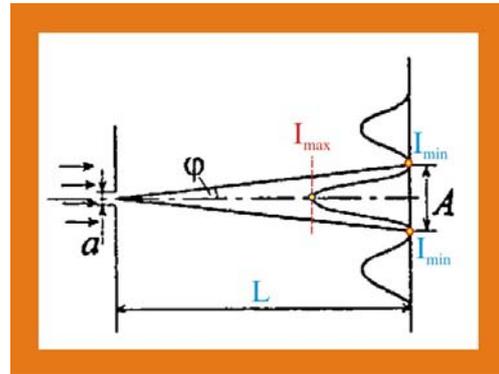


Рис. 261. Дифракция на щели

262. В некоторой среде возбуждаются электромагнитные волны частотой  $\nu = 2,5 \cdot 10^{12}$  Гц и длиной волны с  $\lambda = 60$  мкм. Определить абсолютный показатель преломления среды

**Решение**

1. Определим скорость распространения волны в заданной среде

$$v = \nu \lambda;$$

2. Показатель преломления

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\nu \lambda} \cong \frac{3 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^{12} \cdot 6 \cdot 10^{-5}} = 2;$$

263. На переднюю грань прозрачной стеклянной призмы падают параллельно друг другу зелёный и красный «лучи» лазеров. После прохождения призмы:

- 1) они останутся параллельными;
- 2) они разойдутся так, что не будут пересекаться;
- 3) они пересекутся;

4) ответ зависит от сорта стекла?

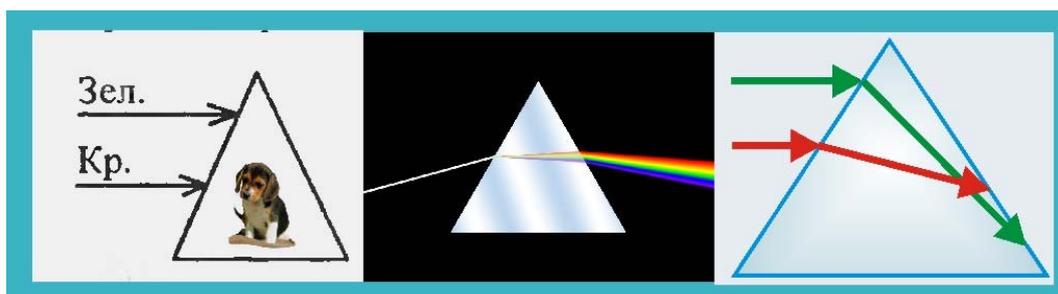


Рис. 263. Ход лучей в призме

### Решение

1. Разложение белого света в спектр обусловлено разной скоростью распространения волн с различной длиной волны, т.е. волны разного цвета отклоняются призмой на разные углы; волны соответствующие зелёному цвету будут отклоняться на большие углы, чем волны, соответствующие красному цвету, поэтому при определённых условиях (при параллельном падении на грань призмы) могут в теле призмы пересекаться.

264. Свет проходит из воздуха в стекло с показателем преломления  $n$ . Какое из следующих утверждений справедливо:

- 1) длина световой волны и скорость света уменьшились в  $n$  раз;
- 2) длина световой волны и скорость света увеличились в  $n$  раз;
- 3) длина световой волны не изменилась, а скорость света уменьшилась в  $n$  раз;
- 4) длина световой волны не изменилась, а скорость света увеличилась в  $n$  раз;

### Решение

1. Если принять для воздуха показатель преломления  $n_1 = 1$ , а для стекла  $n_2 = 1,5$ , то световая волна из оптически менее плотной среды переходит в среду оптически более плотную, т.е. скорость волны должна уменьшаться.

2. Поскольку скорость распространения  $v$  длина волны  $\lambda$  и частота  $\nu$  связаны соотношением

$$v = \nu\lambda,$$

а, частота обусловлена только условиями излучения, то изменение скорости должно сопровождаться изменением длины волны, поэтому верным является второе утверждение.

265. Световая волна выходит из стекла в воздух. Что происходит с частотой, скоростью и длиной волны?

### Решение

1. Волна в данном случае переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, поэтому частота не изменится (см. предыдущую задачу), а скорость и длина волны увеличатся в  $n$  раз, где  $n$  – показатель преломления стекла.

266. Световая волна переходит из воды в воздух. Частота световой волны  $\nu$ , скорость света в воде  $v$ , показатель преломления воды относительно воздуха  $n$ . Установить соответствие между физическими величинами и формулами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ	ФОРМУЛЫ
А) длина волны света в воздухе	1) $\frac{v}{n \cdot \nu}$
Б) длина волны света в воде	2) $\frac{n \cdot v}{\nu}$
	3) $\frac{n \cdot \nu}{v}$
	4) $\frac{v}{\nu}$



Рис. 266. Соответствие между физическими величинами и формулами

### Решение

1. Длина волны в воздухе

$$v = n\lambda\nu; \Rightarrow \lambda = \frac{n\nu}{\nu} = \frac{c}{\nu}; \quad n\nu = c \quad (3);$$

2. Длина волны в воде

$$v = \lambda\nu; \Rightarrow \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu}; \quad (4);$$

## 12. Специальная теория относительности

267. Какое из приведенных ниже утверждений справедливо с точки зрения специальной теории относительности?

Законы, которыми описываются физические явления, одинаковы:

- А) во всех системах отсчёта;
- Б) во всех инерциальных системах отсчёта?

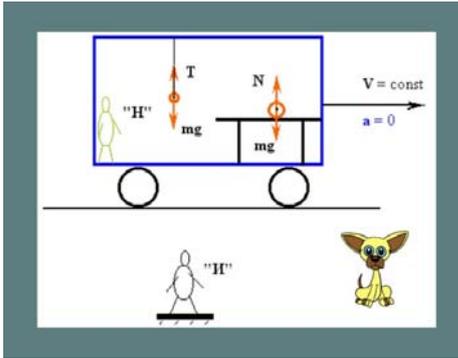


Рис. 267. Инерциальная система

### Решение

1. Хендрик Лоренц, исследуя уравнения Максвелла, Герца, Хевисайда обнаружил, что если в уравнениях сделать подстановку

$$\left. \begin{aligned} x^* &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; & y^* &= y; & z^* &= z; \\ t^* &= \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \end{aligned} \right\}$$

то суть и форма уравнений после подстановки не изменялась. Сейчас эти уравнения называются преобразованиями Лоренца.

2. Французский исследователь Пуанкаре, исследуя преобразования Лоренца в совокупности с уравнениями Максвелла, Герца, Хевисайда пришёл к выводу, что все физические законы не должны изменяться в инерциальной системе отсчёта от преобразований Лоренца и математически это доказал. Он был виртуозным математиком классической школы.

2. Этими откровениями гениев и воспользовался Эйнштейн, опубликовав, разрекламированную в мировом масштабе впоследствии, работу, названную им и последователями теорией относительности. Это был первый и самый грандиозный пиар в науке, который таки увенчался неслыханным успехом. Кто в простонародии знает Максвелла, Герца, Хевисайда, Лоренца и Пуанкаре? А Эйнштейна знают все. Гений веж времён и одного народа.

3. Исходя из преобразований Лоренца и заключений Пуанкаре, появилась возможность проанализировать на новом уровне знаний законы классической механики. Основной закон динамики Ньютона

$$\sum_{k=1}^{k=n} \vec{F}_k = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

предполагает массу постоянной величиной. Из преобразований Лоренца следовало, что масса должна меняться со скоростью (чтобы уравнения Максвелла, Герца, Хевисайда были справедливы)

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

где  $m_0$  – масса покоя (масса неподвижного объекта),  $c \cong 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме. Из уравнения Лоренца видно, что поправка к массе станет заметной при движении исследуемого объекта со скоростями, соизмеримыми со скоростью света, во всех других случаях  $m_0 = m$ . Так, например, для электрона с массой  $m_0 \cong 1 \cdot 10^{-30}$  кг, разогнанного электрическим полем до скорости  $v = 0,01 c \cong 3 \cdot 10^6$  м/с соотношение масс примет вид

$$m \cong \frac{1 \cdot 10^{-30}}{\sqrt{1 - \frac{9 \cdot 10^{12}}{9 \cdot 10^{16}}}} \cong 9,9995 \cdot 10^{-29} \text{ кг};$$

4. Из преобразований Лоренца, придуманных им для электромагнитного поля, следовало, что если допустить движение материального тела с около световыми скоростями, то размеры этого тела в направлении перемещения изменятся

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $L_0$  – размер покоящегося тела,  $L$  – размер того же тела в направлении движения.

5. Изменение геометрических размеров при сохранении неизменной скорости света должно накладывать определённые условия на течение времени. Из преобразований Лоренца следовало, что

$$t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}};$$

6. Таким образом, Лоренцем и Пуанкаре было доказано, что все физические законы, включая и электродинамические должны выполняться во всякой инерциальной системе отсчёта, т.е. системе движущейся прямолинейно и равномерно.

268. Свет от неподвижного источника падает перпендикулярно поверхности зеркала, которое удаляется от источника отражённого света со скоростью  $v$ . Какова будет скорость отражённого света в инерциальной системе отсчёта, связанной с зеркалом?

**Решение**

1. Запишем основное уравнение динамики в виде

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

2. Поскольку в рассматриваемом случае масса не является величиной постоянной, а изменяется в зависимости от скорости движения объекта

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

то уравнение импульса необходимо трансформировать

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

3. Записанное уравнение представляет собой модифицированное преобразованиями Лоренца уравнение импульса в классическом варианте Ньютона.

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

4. Напомним, что в классическом варианте механики, базирующейся на законах Ньютона, импульс пропорционален скорости. Требование постоянства скорости света делает необходимым пересмотреть и уточнить эту закономерность. Дело в том, что при скоростях меньших скорости света классические закономерности сохраняются, а при приближении скорости объекта к скорости света знаменатель в уравнении импульса стремится к нулю

$$\text{при } v \cong c, \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow 0; \Rightarrow p \rightarrow \infty;$$

5. Из уравнений Ньютона следует, в частности, что если на некий материальный объект неопределённо долго воздействовать постоянной силой, то не никаких причин, препятствующих возрастанию скорости этого объекта до бесконечного значения, по крайней мере, теоретически. Иное дело при рассмотрении действия силы с позиций преобразований Лоренца. Скорость объекта не может превышать скорости света, потому, что она постулирована, как предельная постоянная величина. По Лоренцу получается, что, в принципе, при действии силы возрастает не сама скорость, а импульс тела. Другими словами, действие силы сказывается не столько на росте скорости, сколько на увеличении массы.

6. Если во времени рассматривать изменение скорости, т.е. – ускорение, достигает некоторого постоянного значения, а импульс тем временем продолжает увеличиваться за счёт изменения массы. Проявление подобных эффектов регистрируется в ускорителях элементарных заряженных частиц, где разгон последних осуществляется за счёт взаимодействия внешнего магнитного поля и собственного поля ускоренно движущейся частицы. Энергии, необходимые для изменения состояния быстро движущихся частиц превышают величины, рассчитанные по уравнениям Ньютона и следствиям из них. Обратим внимание, что релятивистские эффекты проявляются при взаимодействии электромагнитных полей, поля внешнего и собственного поля частицы.

7. Масса и скорость входят в ещё одну заглавную величину классической механики, комбинация этих величин, полученная преобразованием основного уравнения динамики, приводит к понятию работы и кинетической энергии

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}; \quad \vec{F}d\vec{r} = m \frac{d\vec{v}d\vec{r}}{dt}; \quad \vec{F}d\vec{r} = m\vec{v}d\vec{v}; \quad \int_{v_1}^{v_2} \vec{F}d\vec{r} = m \int_{v_1}^{v_2} \vec{v}d\vec{v}; \quad A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2};$$

8. Уравнение теоремы об изменении кинетической энергии получено в предположении постоянства массы. В соответствии с развиваемыми релятивистскими представлениями, при движении со скоростями соизмеримыми со скоростью света, необходимо ввести в рассмотрение два вида энергии: энергию покоя и энергию движения.

9. Ричард Фейнман в своих знаменитых лекциях прибегает к такому примеру. Если газ, содержащийся в закрытом объёме подвергнуть нагреванию, то по всем классическим законам скорости молекул увеличатся, потому что:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{m_0}},$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя квадратичная скорость молекулы,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $m_0$  – масса покоя молекулы газа.

Суммарная кинетическая энергия молекул увеличится. Это увеличение предлагается рассматривать в виде

$$\Delta E = \Delta mc^2;$$

10.. Далее, для того чтобы преобразования Лоренца были справедливы не только в кинематике но и в динамике, стало необходимым приписать каждому материальному объекту энергию

$$E = mc^2;$$

11. Кстати, идея формально снабдить материальный объект с энергией  $E = mc^2$  принадлежит Оливеру Хевисайду, который записал её в своих дневниках за 12 лет до возникновения шумихи по поводу теории относительности. Биографы Хевисайда полагают, что идея возникла у Хевисайда после знакомства по просьбе Герца с уравнениями Максвелла. Ни о какой относительности, надо думать, Хэвисайд не размышлял. Это откровение появилось при совмещении уравнений Максвелла и преобразований Лоренца.

12. Преобразования Лоренца

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x^* + vt^*}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \\ y &= y^*; \\ z &= z^*; \\ t &= \frac{t^* + \frac{vx^*}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \end{aligned} \right\}$$

потребовали изменить правило сложения скоростей. **Было необходимо получить такое уравнение, которое бы при сложении двух скоростей независимо от взаимного направления и величин давало бы результат не превосходящей скорости света.** Напомним ещё раз, что преобразования Лоренца и уравнения Максвелла описывали только поведение электромагнитного поля, и не более того.

13. Уравнение для сложения скоростей в релятивистском случае представилось следующим образом

$$v_{\Sigma} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}};$$

11. Таким образом, при любых значениях скоростей результирующая скорость будет равна скорости света или меньше её.

269. Какое из приведенных ниже утверждений является постулатом специальной теории относительности?

А. Механические явления во всех инерциальных системах отсчёта протекают одинаково при одинаковых начальных условиях;

Б. Все явления во всех инерциальных системах отсчёта протекают одинаково при одинаковых начальных условиях;

### Решение

1. Верным является утверждение Б, потому что возникновение теории относительности стараниями Лоренца и Пуанкаре было вызвано желанием со-

вместить электродинамику Максвелла, Герца, Хевисайда с принципом относительности Галилея – Ньютона. Преобразования Лоренца изначально писались для анализа не механических, а электромагнитных явлений.

---

270. Закономерности электромагнитных колебаний в одинаковых контурах одновременно изучаются в условиях Земли и на космическом корабле, летящем по инерции вдали от источников гравитации. При каких условиях движения корабля результаты измерений будут одинаковыми?

**Решение**

1. Результаты измерений будут одинаковыми для любого случая движения корабля при условии инерциальности связанной с ним системы отсчёта, т.е. при движении корабля прямолинейно без ускорения. Всякое криволинейное движение является ускоренным, что систему отсчёта, связанную с кораблём переводит в разряд не инерциальных систем.

---

271. Два электрона, испущенные одновременно радиоактивным веществом в противоположных направлениях с одинаковыми скоростями  $v_1 = v_2 = 0,7c$  относительно наблюдателя в лаборатории. Чему равно расстояние между электронами в лабораторной системе отсчёта через  $\tau$  секунд после их излучения?

**Решение**

1. Определим скорость электронов относительно друг друга, воспользовавшись формулой Лоренца

$$v_{\Sigma} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} = \frac{0,7c + 0,7c}{1 + \frac{0,49c^2}{c^2}} = \frac{1,4c}{1,49} \cong 0,94c ;$$

2. Расстояние, пройденное электронами  
 $S = 0,94c\tau.$

---

272. Какую ускоряющую разность потенциалов  $U$  должен пройти электрон, чтобы его скорость составила  $v = 0,95c$ ?

**Решение**

1. Запишем закон сохранения энергии применительно к релятивистскому электрону

$$mc^2 + eU = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \Rightarrow eU = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right);$$

2. Подставим в полученное уравнение значение  $v = 0,95c$

$$eU = 2,2mc^2; \Rightarrow U = \frac{2,2mc^2}{e} \cong \frac{2,2 \cdot 1 \cdot 10^{-30} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 1,24 \cdot 10^6 \text{ В};$$

---

273. Во сколько раз увеличится время существования нестабильной частицы в инерциальной системе отсчёта, неподвижной относительно Земли, если частица движется со скоростью  $v = 0,99 c$ ?

### Решение

1. Применяя следствия из преобразований Лоренца, которые он написал исключительно для электромагнитных полей, для формального изменения времени для системы отсчёта, движущейся со скоростью  $0,99c$ , имеем

$$t^* = \frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad \beta = \frac{v}{c};$$

2. Если мифическая частица при движении со скоростью  $v \ll c$  имеет время жизни  $\tau_0$ , то теоретическое её время жизни при движении с около световой скоростью определится как:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}; \quad \beta = (0,99)^2 \cong 0,9801; \quad \tau^* \cong 7,1\tau_0;$$

3. Увеличение «времени существования» частицы:

$$\zeta = \frac{\tau^*}{\tau_0} \cong 7,1;$$

---

274. Какую разность потенциалов  $U$  должен пройти протон, чтобы его продольные размеры стали в два раза меньше?

### Решение

1. Запишем следующие соотношения, исходя из энергетических соображений:

$$eU = K = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right); \quad \Rightarrow \quad U = \frac{m_0c^2}{e} \left( \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right);$$

2. Комбинацию величин

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

определим по заданному уменьшению размеров протона

$$l = l_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}; \quad \frac{l}{l_0} = \frac{1}{2} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}};$$

$$U = \frac{m_0c^2}{e} \cong \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 9,4 \cdot 10^8 \text{ В}.$$

---

### 13. Элементы квантовой и атомной физики

275. На рис. 275 изображены схемы планетарной модели четырёх атомов. Чёрными точками обозначены электроны. Какая из приведённых схем соответствует атому  ${}^6_4\text{Be}$ ?

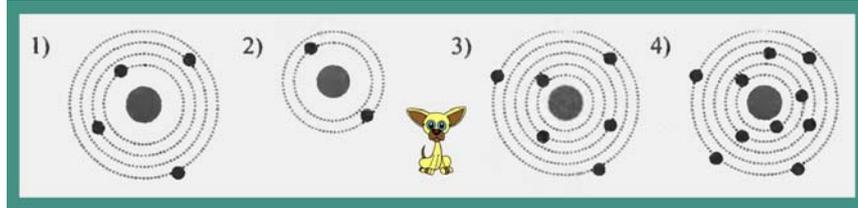


Рис. 275. Схемы электронных оболочек

#### Решение

1. Принято следующее символическое обозначение химических элементов:

$${}^A_Z\text{X},$$

где  $A = (Z+N)$  – массовое число, равное количеству нуклонов, т.е. протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ,  $Z$  – количество протонов в ядре, т.е. заряд ядра. В ядре заданного элемента содержится 4 протона, на орбитах этого изотопа бериллия, таким образом, должно содержаться четыре электрона, только в этом случае атом будет электрически нейтрален. Данному изотопу бериллия соответствует схема 1.

276. Как объясняется явление внешнего фотоэффекта с квантовых позиций?

#### Решение

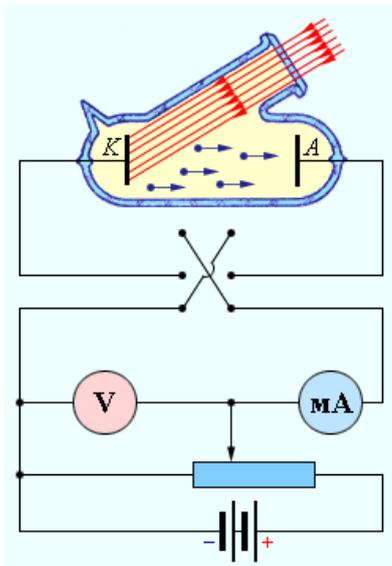


Рис. 276. Установка для исследования фотоэффекта

1. Квантовую гипотезу Планка к фотоэффекту, открытому в 1872 г. русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым, применил Генрих Герц. В его экспериментах свет падал на цезиевый металлический катод (рис. 276), помещённый в откачанную стеклянную колбу с кварцевым окном. При падении на катод света в цепи начинал протекать ток, законы изменения которого и подлежали исследованию.

2. 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

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

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

$$h\tilde{\nu} = W_1 - W_2.$$

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

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

где  $A$  – работа выхода электрона из металла. Кстати, получил за это Нобелевскую премию, отнюдь, не за борьбу за мир во всём мире.

---

277. Красная граница фотоэффекта для натрия  $\lambda_0 = 547$  нм. Найти работу выхода электрона из натрия.

**Решение**

1. Работу выхода определим из уравнения красной границы фотоэффекта

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}; \Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda_0} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,47 \cdot 10^{-7}} \cong 3,62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 2,26 \text{ эВ};$$

---

278. Какова наименьшая частота света, при которой ещё наблюдается фотоэффект, если работа выхода электрона из металла  $A = 3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж?

**Решение**

1. Минимальная частота, при которой возможен фотоэффект

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \cong \frac{3,3 \cdot 10^{-19}}{6,6 \cdot 10^{-34}} \cong 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц};$$

---

278. Вычислить длину волны  $\lambda_0$  красной границы фотоэффекта для серебра.

**Решение**

1. Работа выхода серебра равна  $A(\text{Ag}) = 6,85 \cdot 10^{-19}$  Дж, поэтому:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,85 \cdot 10^{-19}} \cong 2,9 \cdot 10^7 \text{ Гц};$$

---

279. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла  $\lambda_0 = 2750 \text{ \AA}$ . Чему равно минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект?

**Решение**

1. Минимальное значение энергии фотона с длиной волны  $\lambda_0$  определится как:

$$\epsilon_f = \frac{hc}{\lambda_0} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,7 \cdot 10^{-7}} \cong 7,33 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 4,6 \text{ эВ};$$

---

280. Максимальная кинетическая энергия электронов, вылетающих из рубидия при его освещении ультрафиолетовыми лучами с длиной волны  $\lambda = 3,17 \cdot 10^{-7}$  м, составляет  $K = 2,84 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определить работу выхода электронов из рубидия и красную границу фотоэффекта для этого металла.

**Решение**

1. Работу выхода определим из уравнения фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A + K_e; \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda} - K_e \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,17 \cdot 10^{-7}} - 2,84 \cdot 10^{-19} \cong 3,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 2,13 \text{ эВ};$$

2. Красная граница фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda_0} = A; \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{A} \cong \frac{1,98 \cdot 10^{-25}}{3,4 \cdot 10^{-19}} \cong 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

281. Серебряную пластинку освещают светом с частотой  $\nu = 2 \cdot 10^{15}$  Гц. Найти максимальную кинетическую энергию электронов.

**Решение**

1. Работа выхода электронов из серебра  $A_{Ag} = 6,85 \cdot 10^{-19}$  Дж. Уравнение фотоэффекта даёт:

$$h\nu = A_{Ag} + K_e; \Rightarrow K_e = h\nu - A_{Ag} \cong 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot 10^{15} - 6,85 \cdot 10^{-19};$$

$$K_e \cong 6,35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 4 \text{ эВ};$$

282. Вольфрамовую пластину освещают светом с длиной волны  $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$  м. Найти максимальный импульс вылетающих электронов.

**Решение**

1. Запишем уравнение фотоэффекта, из которого определим максимальную скорость вылета электронов из вольфрама

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{m_e v_m^2}{2}; \Rightarrow v_m = \sqrt{\frac{2}{m_e} \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right)};$$

2. Найдём величину максимального импульса электрона

$$p_e = m_e v_m = \sqrt{2m_e \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right)};$$

3. Воспользуемся табличными данными:  $m_e \approx 1 \cdot 10^{-30}$  кг;  $A_W \approx 7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж

$$p_e \cong \sqrt{2 \cdot 10^{-30} \left( \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} - 7,2 \cdot 10^{-19} \right)} \cong 7,35 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

283. Пластину освещают монохроматическим излучением с длиной волны  $\lambda = 3,125 \cdot 10^{-7}$  м. Известно, что наибольшее значение импульса, передаваемого одним фотоэлектроном, равно  $p = 3,3 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с. Определить работу выхода электрона.

### Решение

1. Воспользуемся уравнением, полученным в предыдущей задаче

$$p_e = m_e v_m = \sqrt{2m_e \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right)};$$
$$p_e^2 = 2m_e \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right); \quad \frac{p_e^2}{2m_e} = \frac{hc}{\lambda} - A;$$
$$A = \frac{hc}{\lambda} - \frac{p_e^2}{2m_e} \cong \frac{1,98 \cdot 10^{-25}}{3,125 \cdot 10^{-7}} - \frac{1 \cdot 10^{-49}}{2 \cdot 10^{-30}} \cong 5,836 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 3,65 \text{ эВ};$$

---

284. Какой скоростью обладают электроны, вырванные с поверхности натрия, при его облучении световыми волнами с частотой  $\nu = 4,5 \cdot 10^{15}$  Гц? Определить наибольшую длину волны излучения, вызывающего фотоэффект.

### Решение

1. Запишем уравнение фотоэффекта, из которого определим максимальную скорость вылета электронов из вольфрама

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{m_e v_m^2}{2}; \quad \Rightarrow \quad v_m = \sqrt{\frac{2}{m_e} (h\nu - A)};$$

2. Работа выхода электронов из натрия  $A = 3,63 \cdot 10^{-19}$  Дж, масса электрона  $m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$  кг

$$v_m \cong \sqrt{\frac{2}{10^{-30}} (6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 4,5 \cdot 10^{15} - 3,63 \cdot 10^{-19})} \cong 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

3. Из уравнения фотоэффекта следует, что максимальная длина волны для данного вещества определится уравнением

$$\frac{hc}{\lambda_m} = A; \quad \Rightarrow \quad \lambda_m = \frac{hc}{A} \cong \frac{1,98 \cdot 10^{-25}}{3,63 \cdot 10^{-19}} \cong 5,45 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

---

285. Максимальная скорость фотоэлектронов, вырванных с поверхности меди при фотоэффекте, составляет  $v = 9,3 \cdot 10^6$  м/с. Определить частоту света, вызывающего фотоэффект.

### Решение

1. Запишем уравнение фотоэффекта

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

которое разрешим относительно частоты  $\nu$  с учётом того, что работа выхода для меди составляет  $A_{\text{Cu}} = 4,15 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $m_e \cong 10^{-30}$  кг

$$\nu = \frac{2A_{\text{Cu}} + m_e v^2}{2h} \cong \frac{8,3 \cdot 10^{-19} + 10^{-30} \cdot 8,65 \cdot 10^{13}}{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-34}} \cong 6,6 \cdot 10^{15} \text{ Гц};$$

---

286. Таблице приведены результаты измерения величины задерживающего напряжения при фотоэффекте. В результате измерений было получено значение постоянной Планка  $h \cong 5,3 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Определить пропущенное в таблице значение задерживающего напряжения.

Задерживающее напряжение U, В	–	0,6
Частота $\nu \cdot 10^{14}$ , Гц	5,5	6,1

### Решение

1. По результатам измерений, записанных во втором столбце, определим работу выхода пластины фотокатода:

$$h\nu_2 = \frac{m_e v^2}{2} + A; \quad \frac{m_e v^2}{2} = eU_2; \quad h\nu_2 = eU_2 + A;$$

$$A = h\nu_2 - eU_2 = 5,3 \cdot 10^{-34} \cdot 6,1 \cdot 10^{14} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,6 \cong 2,27 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

2. Запишем уравнение фотоэффекта для первого столбца измерений

$$h\nu_2 = A + eU_1; \quad \Rightarrow \quad U_1 = \frac{h\nu_2 - A}{e} \cong \frac{5,3 \cdot 10^{-34} \cdot 5,5 \cdot 10^{14} - 2,27 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 0,4 \text{ В};$$

287. В таблице представлены результаты измерений запирающего напряжения для фотоэлектронов при двух различных значениях частоты падающего монохроматического света, которая выражена через красную границу фотоэффекта  $\nu_{\text{кр}}$ . Определить значение запирающего напряжения, отсутствующее в таблице.

Частота падающего света $\nu$	$2\nu_{\text{кр}}$	$3\nu_{\text{кр}}$
Запирающее напряжение $U_3$	$U_0$	?

### Решение

1. Красная граница фотоэффекта определяется условием равенства работы выхода материала катода энергии падающих фотонов

$$h\nu_{\text{кр}} = A;$$

2. Уравнение внешнего фотоэффекта Генриха Герца можно представить следующим образом

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + h\nu_{\text{кр}},$$

или через запирающее напряжение

$$\frac{mv^2}{2} = eU; \quad h\nu = eU + h\nu_{\text{кр}}; \quad \Rightarrow \quad U = \frac{h(\nu - \nu_{\text{кр}})}{e};$$

3. Применительно к рассматриваемому случаю можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \frac{h(2\nu_{\text{кр}} - \nu_{\text{кр}})}{e}; \\ U_x &= \frac{h(3\nu_{\text{кр}} - \nu_{\text{кр}})}{e}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{U_0}{U_x} = \frac{1}{2}; \quad U_x = 2U_0;$$

288. Заданы графики зависимости максимальной энергии фотоэлектронов от энергии падающих на фотокатоды фотонов. Работа выхода материала фотокатода:

- 1) наименьшая в случае I;
- 2) наименьшая в случае II;

- 3) одинаковая в случаях I и II;  
 4) не зависит от материала фотокатода.

**Решение**

1. Рассмотрим ситуацию, когда кинетическая энергия фотоэлектронов равна нулю

$$h\nu = \frac{m_e v^2}{2} + A; \quad \frac{m_e v^2}{2} = 0;$$

$$h\nu = A,$$

т.е. отрезки оси энергий фотонов, отсекаемые заданными прямыми, будут соответствовать работе выхода. Другими словами, работа выхода фотокатода I меньше работы выхода фотокатода II.

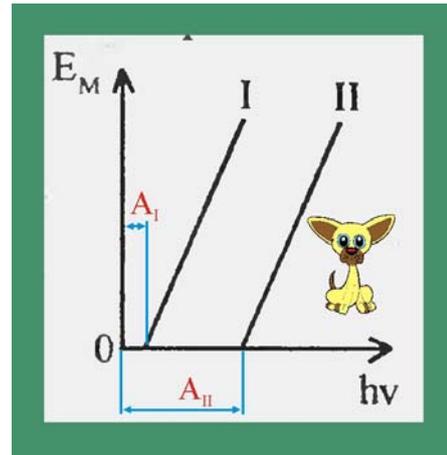


Рис. 288. Зависимость энергии электронов от энергии фотонов

289. Работа выхода из материала 1 больше, чем работа выхода из материала 2. Максимальная длина волны, при которой может наблюдаться фотоэффект на материале 2, равна  $\lambda_2$ . На основании законов внешнего фотоэффекта можно утверждать, что:

- 1)  $\lambda_1 < \lambda_2$ ;
- 2)  $\lambda_1 = \lambda_2$ ;
- 3)  $\lambda_1 > \lambda_2$ ;
- 4)  $\lambda_1$  может быть как больше, так и меньше  $\lambda_2$ .

**Решение**

1. В условии задачи рассматриваются, по сути, красные границы фотоэффектов, выраженные через соответствующие длины волн. Составим систему уравнений на основании законов внешнего фотоэффекта

$$\left. \begin{array}{l} \frac{hc}{\lambda_1} = A_1; \\ \frac{hc}{\lambda_2} = A_2; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \frac{A_1}{A_2} > 1; \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2;$$

290. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная энергия вылетевших фотоэлектронов при уменьшении частоты падающего света в 2 раза?

**Решение**

1. Из уравнения внешнего фотоэффекта Генриха Герца следует:

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

где  $A$  – работа выхода материала фотокатода.

2. При уменьшении частоты в два раза максимальная кинетическая энергия вылетающих электронов уменьшится более, чем в два раза, потому что из уменьшенной в два раза энергии фотонов вычитается работа выхода.

291. Металлическая пластина освещается светом с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Зависимость силы фототока  $I$  от электрического потенциала  $U$  пластинки представлена на рис. 291. Определить работу выхода электронов из металла.

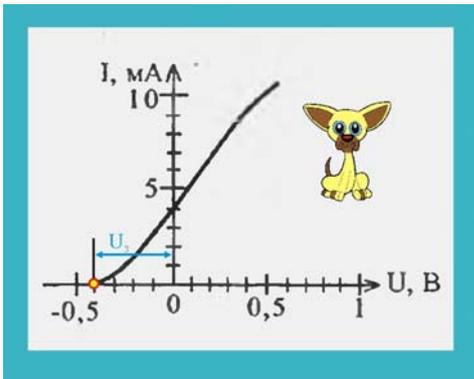


Рис. 291. Зависимость силы фототока от потенциала пластинки

### Решение

1. По заданному графику определяем задерживающий потенциал

$$U_3 = 0,4 \text{ В};$$

2. Запишем уравнение внешнего фотоэффекта при условии, что задерживающее напряжение  $U_3$  прекращает вылет электронов с фотокатода

$$\frac{hc}{\lambda} = eU_3 + A; \Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda} - eU_3;$$

$$A \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,4 \cong 2,66 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 1,66 \text{ эВ}.$$

292. При освещении ультрафиолетовым светом с частотой  $\nu = 10^{15}$  Гц металлического проводника с работой выхода  $A = 3,11$  эВ выбивают электроны. Чему равна максимальная скорость фотоэлектронов?

### Решение

1. Уравнение внешнего фотоэффекта Генриха Герца

$$h\nu = \frac{m_e v^2}{2} + A; \quad 2h\nu = m_e v^2 + 2A; \quad 2(h\nu - A) = m_e v^2;$$

$$v = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m_e}} \cong \sqrt{\frac{2(6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{15} - 3,11 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})}{1 \cdot 10^{-30}}} \cong 5,7 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

293. Капля воды массой  $0,2$  г нагревается светом с длиной волны  $\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7}$  м. Какое количество фотонов  $\zeta$  поглощается водой ежесекундно, если скорость нагревания капли  $\Delta T/\Delta \tau = 5$  К/с?

### Решение

1. Количество тепла, потребляемое каплей воды

$$Q = c_T m \Delta T;$$

2. Энергия ежесекундно поглощаемых квантов

$$E_\tau = \zeta \frac{hc}{\lambda} \Delta \tau;$$

3. Приравняем

$$Q = E_\tau; \quad \zeta \frac{hc}{\lambda} \Delta \tau = c_T m \Delta T; \Rightarrow \zeta = \frac{c_T m \Delta T \lambda}{hc \Delta \tau};$$

$$\zeta = \frac{4200 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7}}{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \cong 1,17 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1};$$

294. Какое открытие сделал Эрнст Резерфорд, экспериментируя с  $\alpha$  – частицами?

### Решение

1. Резерфорд занимался исследованием положительно заряженных частиц, выбрасываемых радиоактивными веществами,  $\alpha$  – частицами. В начале 1908 г. Резерфорд установил, что эти частицы представляют атомы гелия, лишенные двух своих электронов, т.е. заряд этих частиц был равным  $+2e$ . Резерфорд решил использовать  $\alpha$  – частицы для выяснения структурных особенностей атома и соответствия их модели своего учителя. Резерфорд установил, что каждая  $\alpha$  – частица, попадая на экран, покрытый сернистым цинком, вызывала световую вспышку (сцинтилляцию), которую можно заметить в темноте после адаптации зрения.

2. На рис. 294.1 (фрагмент 1) показана условная схема экспериментальной установки Резерфорда. Коллиматор из свинца (контейнер толстыми стенками), был снабжён отверстием малых размеров, что позволяло получать узкий пучок  $\alpha$  – частиц, который направлялся на листок золотой фольги, который должен был рассеивать частицы. Окрестности фольги были окружены экраном, покрытым сернистым цинком. Наблюдения за вспышками производились с помощью микроскопа.

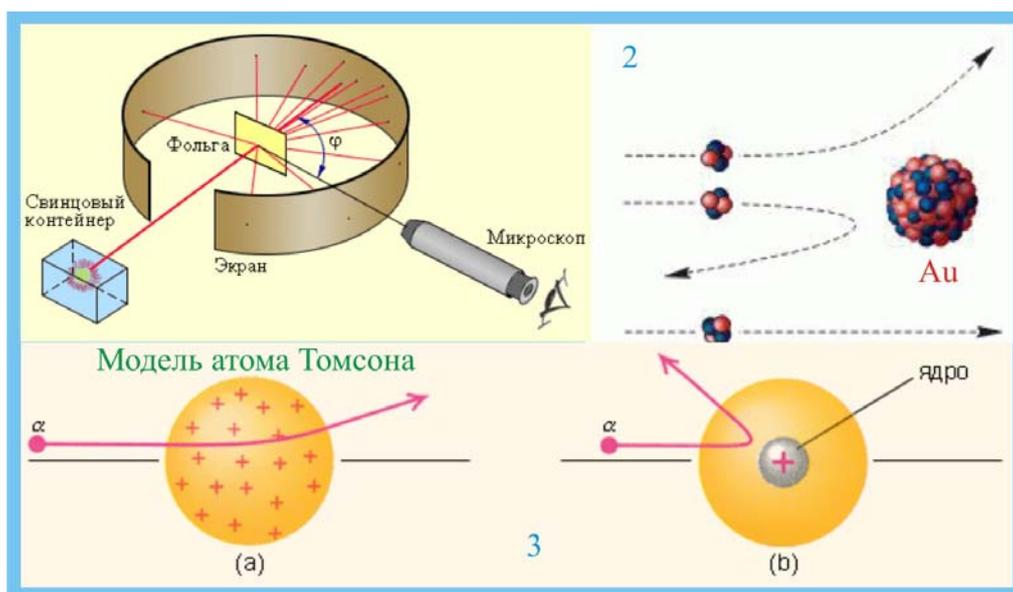


Рис. 294.1. Эксперименты Резерфорда с  $\alpha$  – частицами

3. В качестве рассеивающего вещества золото было выбрано не из-за цвета и престижности. Дело в том, что золото один из самых пластичных металлов с высокой плотностью, который можно прокатать таким образом, что в толщине фольги будет уместиться всего несколько атомных слоёв. Первоначально в установке Резерфорда экран имел прямоугольную форму и был совмещён с микроскопом. Источник  $\alpha$  – частиц, золотая фольга, экран и микроскоп располагались в камере, из которой откачивали воздух (рис. 294.2). Микроскоп с экраном совместно с

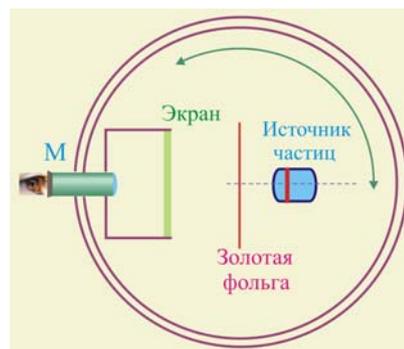


Рис. 294.2. Схема установки

корпусом камеры могли вращаться вокруг фольги, которая постоянно обстреливалась  $\alpha$  – частицами. Таким образом Резерфорд мог с 360 градусным обзором наблюдать рассеяние  $\alpha$  – частиц.

4. Если бы атом золота был таким как его представлял Томсон (фрагмент *a* рис. 294.1), то  $\alpha$  – частицы должны были отклоняться на достаточно малые углы. Вращая детектор из сернистого цинка, исследователи могли измерять относительное число  $\alpha$  – частиц, рассеянных под различными углами  $\theta$ . Согласно модели атома Томсона,  $\alpha$  – частицы должны были свободно проходить сквозь атомы золота, и только некоторые из них должны были слегка отклоняться кулоновскими силами. Следовало ожидать, что поток  $\alpha$ - частиц пройдя фольгу, слегка расплывется, и средние углы рассеяния будут составлять несколько градусов. Такое рассеяние действительно наблюдалось, но совершенно неожиданно, одна из **20 000** частиц, падающих на фольгу толщиной всего  $4 \cdot 10^{-7}$  м, возвращалась назад, в сторону источника. Резерфорд по этому поводу писал: **« Это было самое невероятное событие, с которым мне когда- либо пришлось сталкиваться. Это было так же невероятно, как если бы вы выстрелили 15 дюймовым (38 см) снарядом в лист папиросной бумаги, а снаряд бы вернулся назад и попал в вас».**

5. Резерфорду потребовалось несколько лет (до 1911 г.), чтобы окончательно разобраться с этим явлением. Он пришёл к выводу, что атом не однороден и имеет нечто очень малое массивное и с положительным зарядом, сосредоточенное в центре. Таким образом, была предложена ядерная модель атома.

6. Резерфорд наблюдал, что  $\alpha$  – частицы способные проникать через тонкие листочки металлов, при этом они отклоняются от первоначального направления своего движения. Было естественно допустить, что эти отклонения вызваны отталкиванием положительно заряженных  $\alpha$  – частиц от положительных зарядов атома. Силы, действующие на  $\alpha$  – частицы со стороны электронов, не могут заметно изменить направления их движения из-за слишком малой массы электронов.

7. Можно показать, что результат рассеяния существенно зависит от размеров объема, в пределах которого распределен положительный заряд атома. Только при малом размере положительного заряда атома силы отталкивания могут оказаться настолько большими, чтобы вызвать отклонение траекторий  $\alpha$  – частиц на значительные углы. Если же положительный заряд атома распределен в пределах значительного объема, как полагал Томсон, то каждое прохождение  $\alpha$  – частицы вблизи атома отклонит ее на небольшой угол. Рассеяние  $\alpha$  – частиц в этом случае будет незначительным.

8. Действительно, длительные наблюдения Резерфорда и ассистентов показали, что в большинстве своём  $\alpha$  – частицы к удовольствию Томсона рассеиваются на достаточно малые углы, порядка  $1 - 3^{\circ}$ . Статистика распределения по углам отклонения хорошо описывалась кривой Гаусса. Но, весьма редко, но всё же не случайно,  $\alpha$  – частицы отклонялись на углы, превышающие  $145^{\circ}$ , причём золото было не аномальным веществом. Фольга из платины демонстрировала те же тенденции, примерно каждая из 8000 частиц, отклонялась на углы более  $90^{\circ}$ . Исследователем стало ясно, что случаи «нестандартного» рассеяния требуют пересмотра модели атома. Получалось (фрагмент 2 рис. 294.1), что летящая  $\alpha$  – частица время от времени встречала на своём пути нечто, локализованное в малом объёме и имеющее непременно положительный заряд. Такая ситуация складывается при соударении одинаковых по размеру и шаров,

когда массивный шар из свинца, например, покоится, а на него налетает лёгкий пластмассовый шарик. При центральном ударе свинцовый шар имеет незначительное перемещение, а лёгкий шарик отбрасывается в сторону противоположную первоначальному направлению. Редкость таких событий могла объясняться, что попадать в это «ничто» сложно, ввиду его малости в сравнении с размерами всего атома Резерфорд до описываемых экспериментов уже получал  $\alpha$  – частицы не из радиоактивных веществ, а двойной ионизацией атомов гелия. Он знал, что  $\alpha$  – частицы – это атом гелия (положительный ион) лишённый электронов. А кулоновское взаимодействие описывается известным уравнением

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где  $r$  – расстояние между взаимодействующими зарядами. Из этого уравнения следует, что при уменьшении расстояния между взаимодействующими частицами сила Кулона увеличивается, при  $r \rightarrow 0$ ;  $F_k \rightarrow \infty$ .

**9. На основании экспериментов и проведенного анализа результатов Резерфорд пришёл к заключению, что в центре атома расположена массивная материальная частица с положительным зарядом, которую он назвал – ядро атома.** Прижилось, надо сказать, название. Далее Резерфорд начал решать, так называемую задачу Кеплера о взаимодействии планеты с Солнцем. В кеплеровском случае тоже действуют центральные силы изменяющиеся обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

10. Пусть  $\alpha$  – частица на относительно большом от ядра расстоянии движется со скоростью  $v$ , направленной вдоль прямой (рис. 294.3). Обозначим через  $y$  наименьшее расстояние между направлением вектора скорости  $\alpha$  – частиц и центром атома  $O$ , в котором расположен его положительный заряд  $Ze$ . Величина  $y$  называется прицельным расстоянием. При наличии центральных электростатических сил взаимодействия между  $\alpha$  – частицей и зарядом  $Ze$ , которые являются консервативными,  $\alpha$  – частица движется по гиперболе. Вблизи положительно заряженного ядра на  $\alpha$  т – частицу действует сила

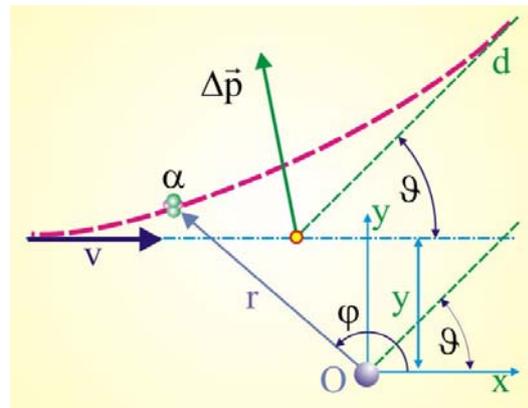


Рис. 294.3. Рассеяние  $\alpha$  – частиц

между  $\alpha$  – частицей и зарядом  $Ze$ , которые являются консервативными,  $\alpha$  – частица движется по гиперболе. Вблизи положительно заряженного ядра на  $\alpha$  т – частицу действует сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}.$$

11. Естественно в этой связи предположить, что чем меньше прицельное расстояние  $y$ , тем на больший угол отклоняется  $\alpha$  – частица. Изменение импульса  $\alpha$  – частицы будет равно

$$|\Delta\vec{p}| = 2m_\alpha \sin \vartheta/2.$$

12. Угол отклонения  $\alpha$  – частицы  $\vartheta$ , который одновременно является углом между асимптотами гиперболы. Определяется соотношением

$$\vartheta = 2 \arctg \left( \frac{m_\alpha v^2}{2e \cdot Ze} \cdot y \right).$$

где  $m_\alpha$  – масса  $\alpha$  – частицы. Масса  $\alpha$  – частицы, по современным представлениям,  $m_\alpha \cong 6,5 \cdot 10^{-27}$  кг, а масса ядра золота  $M(\text{Au}) \cong 3,25 \cdot 10^{-25}$  кг. Другими словами ( $M_{\text{Au}} \gg m_\alpha$ ), т.е. массу ядра можно считать существенно большей по сравнению с пролетающими  $\alpha$  – частицами. Из формулы  $\vartheta$  видно, что угол отклонения тем больше, чем меньше прицельное расстояние  $u$ . При малых прицельных расстояниях угол отклонения может принимать значения  $\theta > \pi/2$ , т.е.  $\alpha$  – частица может оказаться в результате столкновения с атомом отброшенной назад.

13. Предположив, что кулоновская сила отталкивания между  $\alpha$ -частицей и атомным ядром изменяется по закону  $1/r^2$  даже в области чрезвычайно малых внутриатомных расстояний порядка  $10^{-15}$  м, Резерфорд вывел выражение для  $\alpha$  – частиц, рассеянных при столкновениях с ядрами. Он показал, что вероятность рассеяния на угол  $\vartheta$  обратно пропорциональна четвертой степени синуса угла рассеяния, т.е.

$$W \sim \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}.$$

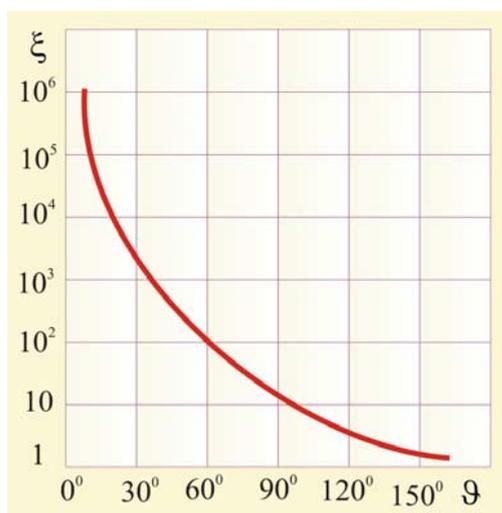


Рис. 294.4. Зависимость относительного числа  $\alpha$  – частиц от угла рассеяния

13. Кривая зависимости относительного числа частиц  $\xi = N_\Sigma/N_\theta$  от угла рассеяния приведена на рис. 294.4. Вероятность рассеяния на углы, превышающие  $90^\circ$  чрезвычайно мала по сравнению с рассеянием на малые углы. Так, частота рассеяния на угол  $\vartheta = 120^\circ$  относится к частоте рассеяния на угол  $6 - 5^\circ$  приблизительно как  $1/10^5$ .

14. Измерения, тщательно выполненные соратниками Резерфорда по атомным исследованиям Гейгером и Марсденом, подтвердили правильность предложенной Резерфордом ядерной модели во всех пунктах; было не только убедительно показано, что в состав атомов входят ядра чрезвычайно малых размеров ( $\sim 10^{-15}$  м), окруженных электронами, но и было, за одно, подтверждено, что закон Кулона справедлив для таких малых расстояний.

15. Полученные экспериментальные данные и проделанные вычисления послужили основанием для разработки планетарной модели атома (рис. 294.5).

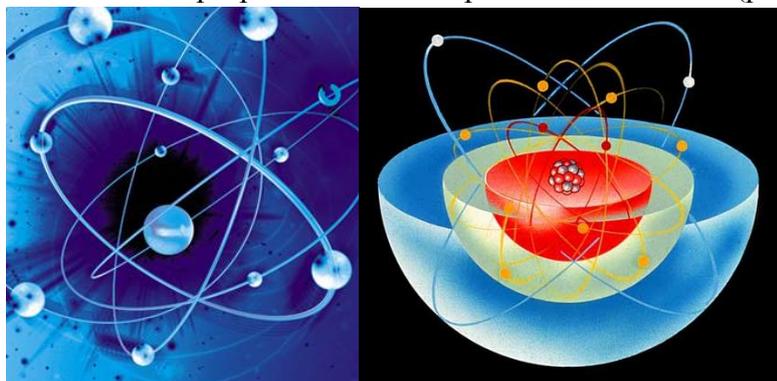


Рис. 294.5. Планетарная модель атома Эрнста Резерфорда

16. Размер ядра можно оценить, приняв, согласно Резерфорду, что  $\alpha$  – частицы могут отклоняться на угол  $180^\circ$ . Наименьшее расстояние  $y_0$ , на которое может сблизиться  $\alpha$  – частица с ядром золота ( $Z = 79$ ), возможно найти сравнивая кинетическую и потенциальную энергию взаимодействующих объектов. Связывая систему отсчёта с центром масс системы ядро - частица, и пренебрегая кинетической энергией ядра атома золота, можно записать

$$\frac{mv^2}{2} \approx \frac{Ze \cdot 2e}{4\pi\epsilon_0 y_0};$$

Оценочные расчеты показали, что прицельное расстояние  $y_0 \cong 3 \cdot 10^{-14}$  м, оказалось несколько завышенным. Формула может быть использована для определения атомного номера  $Z$ , рассеивающего атома.

17. Круговые орбиты электронов по классическим представлениям не должны были быть стационарными вследствие излучения электромагнитных волн, атомы же, как известно, образования чрезвычайно устойчивые. Это противоречие удалось объяснить только после более тщательных исследований, в частности, при анализе спектров излучения атомов.

19. Когда стало очевидным, что во взаимодействии  $\alpha$  – частиц и ядер преобладают кулоновские силы, имеющие сходные с гравитационными силами, удерживающими планеты вокруг Солнца, то аналогия с планетной системой не преминула возникнуть. Резерфорд свою модель атома так и назвал – планетарная модель атома в которой отрицательно заряженные электроны, подобно планетам солнечной системы вращаются вокруг ядра, несущего положительный заряд в точности равный модулю суммарного электрического заряда всех электронов, мечущихся по своим орбитам. Вместе с тем, несмотря на очевидные достоинства планетарной модели атома, она не раскрывала одно существенное обстоятельство. В соответствии с законами классической электродинамики, всякая ускоренно движущаяся заряженная частица должна излучать электромагнитные волны, т.е. в процессе движения должна терять энергию, т.е. уменьшать радиус своей круговой орбиты. Если это так, то электроны должны были, в конце концов, упасть на ядро. А поскольку атомы демонстрировали устойчивость, то модель Резерфорда этот нюанс не объясняла. Другими словами классические представления не могли объяснить устойчивость атомов. Это было сделано позже, при рассмотрении атома как квантово-механической системы.

295. Энергия ионизации атома водорода равна  $E_0$ . Какую минимальную энергию нужно затратить, чтобы электрон перешёл из основного состояния в первое возбуждённое состояние?

### Решение

1. Из закономерностей энергетических уровней атома водорода

$$E_{\min} = E_0 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = E_0 \left( 1 - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} E_0;$$

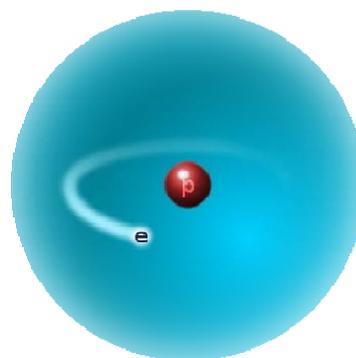


Рис. 295. Модель атома водорода

296. Какими экспериментами была подтверждена гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц?

### Решение

1. Теория водородоподобного атома Нильса Бора позволила объяснить его линейчатые спектры, обусловленные переходами электрона из одного стационарного состояния в другое, с меньшей энергией. Каждая, регистрируемая экспериментально спектральная линия является свидетельством акта испускания фотона определённой длины волны, при переходе электрона на низший энергетический уровень. Придавая  $n$  различные значения можно получить теоретически спектр излучения атома водорода.

2. Сам Нильс Бор лучше других осознавал недостатки своей теории, как промежуточного звена между, планетарной моделью атома и квантовыми представлениями. Необходимость в корректировке теории напрашивалась по многим причинам, основной из которых являлась корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного поля. То, что свет в зависимости от обстоятельств эксперимента вёл себя-то как волна, то как поток частиц, говорило о необходимости привлечения для объяснения это странности кванта действия Макса Планка.

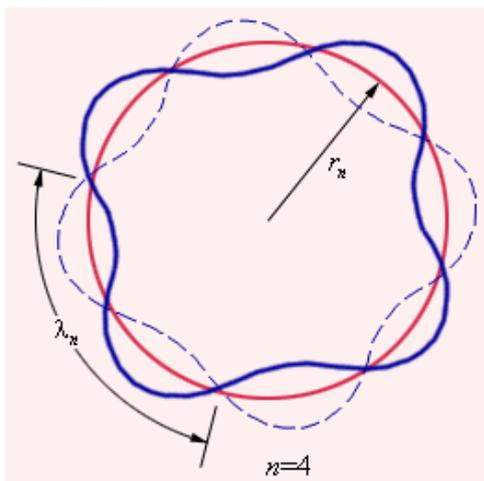


Рис. 296.1. Волны де Бройля

3. Идея теоретического объединения частиц (корпускул) и волн принадлежала французскому физику Луи де Бройлю (рис. 296.1), который предположил, что движение электрона или другой частицы с массой покоя отличной от нуля по орбите, можно отождествить с волновым процессом. Де Бройль провёл аналогию между энергией кванта и импульсом частицы

$$\varepsilon = h\nu \Leftrightarrow p = h/\lambda,$$

откуда длина волны де Бройля для электрона определяется как

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}.$$

4. Согласно гипотезе де Бройля стационарными будут те орбиты электрона, на которых укладывается целое число волн

$$2\pi r_n = n\lambda$$

5. Приписав частицам, волновые свойства де Бройль объяснил такое необычное для классической физики явление как дифракция интерференция электронов на узкой щели (рис. 296.2).

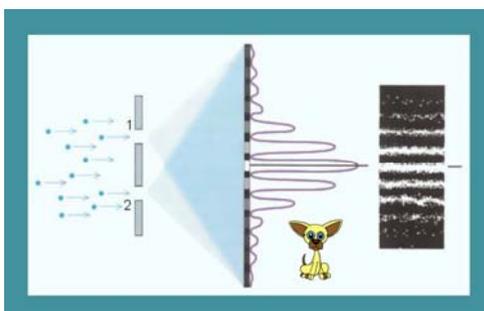


Рис. 296.2. Дифракция электронов

297. Длина волны де Бройля для электрона больше, чем для  $\alpha$  – частицы. Что можно сказать об импульсе этих частиц?

### Решение

1. Де Бройль провёл аналогию между энергией кванта и импульсом частицы, приписав тем самым частицам волновые свойства

$$\varepsilon = h\nu \Leftrightarrow p = h/\lambda,$$

откуда длина волны де Бройля для электрона определяется как

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}.$$

2. Так как по условию задачи  $\lambda_e > \lambda_\alpha$ , а импульс частиц  $p = mv$ , т.е.

$$\lambda = \frac{h}{p}; \Rightarrow \lambda_e = \frac{h}{p_e}; \lambda_\alpha = \frac{h}{p_\alpha}; p_\alpha > p_e;$$

---

298. На поверхность металла падает электромагнитное излучение, выбивающее с поверхности электроны. Максимальная кинетическая энергия электронов, вылетевших из металла в результате фотоэффекта, составляет 6 эВ, а энергия падающих фотонов в три раза больше работы выхода из металла. Определить работу выхода электронов.

### Решение

1. Запишем уравнение внешнего фотоэффекта с учётом заданных в условии параметров

$$3A = E_m + A; \Rightarrow 2A = E_m; A = \frac{E_m}{2} = 3\text{эВ};$$

---

299. Определить величину энергии ионизации атома водорода в возбужденном состоянии, если известно, что радиус орбиты его электрона равен  $r$ .

### Решение

1. В качестве энергии ионизации принимается величина минимальной энергии, которую нужно сообщить электрону, чтобы удалить его от ядра на бесконечное расстояние, т.е. скорость электрона на бесконечности должна быть равна нулю. В соответствие с законом сохранения энергии:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r},$$

из уравнения очевидно, что при  $r \rightarrow \infty$ ,  $v \rightarrow 0$ ,  $E_\infty = 0$ .

2. Уравнение энергии ионизации представится следующим образом:

$$E_i = E_\infty - E = -E;$$

3. Для электрона, находящегося на стационарной круговой орбите справедлива следующая запись закона Ньютона

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r};$$

4. Решая записанные выше уравнения совместно, получим:

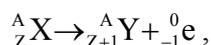
$$E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2r};$$

---

300. Как изменится заряд и массовое число радиоактивного ядра в результате его  $\beta^-$  – распада?

**Решение**

1. Запишем правило смещения при  $\beta^-$  – распада



т.е. массовое число не изменяется, а зарядовое число увеличивается на единицу.

301. При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_m$  в другое состояние с энергией  $E_n$  испускается фотон. Определить его частоту.

**Решение**

1. Энергия испускаемого фотона определяется уравнением:

$$h\nu = E_m - E_n; \Rightarrow \nu = \frac{E_m - E_n}{h};$$

302. Нагретый газ углерод  ${}^{15}_6 C$  излучает свет. Этот изотоп испытывает  $\beta^-$  распад с периодом полураспада  $T_{1/2} = 2,5$  с. Как изменится спектр излучения всего за  $\tau = 5$  с?

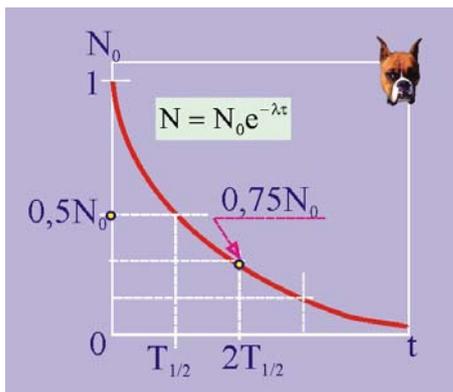


Рис. 302. Закон радиоактивного распада

**Решение**

1. На основании закона радиоактивного распада в течение 2,5 с распадется половина всех ядер изотопа углерода  $N_0$ , превратившись в ядра изотопа азота, через 5 с в контрольном объёме распадётся  $0,75N_0$  от первоначального числа ядер, останется только  $0,25 N_0$  углерода, поэтому спектр свечения углерода станет менее ярким, и появятся спектральные составляющие изотопа азота.

303. Задан график изменения числа ядер находящегося в пробирке радиоактивного изотопа с течением времени. Определить период полураспада ядер этого изотопа.

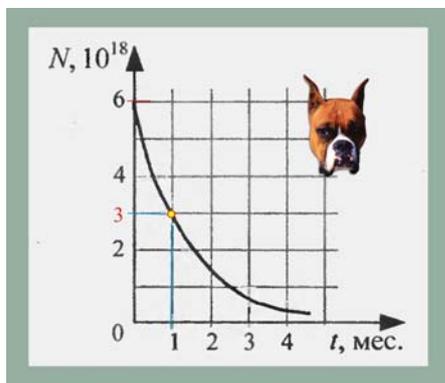


Рис. 303. Период полураспада

**Решение**

1. Судя по заданному графику распада в пробирке, первоначально находилось  $N_0 = 6 \cdot 10^{18}$  ядер радиоактивного вещества.

2. В течение периода полураспада количество материнских ядер должно уменьшиться в два раза, т.е. стать равным

$$N_{1/2} = \frac{N_0}{2} = 3 \cdot 10^6,$$

период полураспада в этом случае согласно графика  $T_{1/2} = 1$  месяц.

304. Какое физическое явление используется для исследования рентгеновских спектров испускания?

### Решение

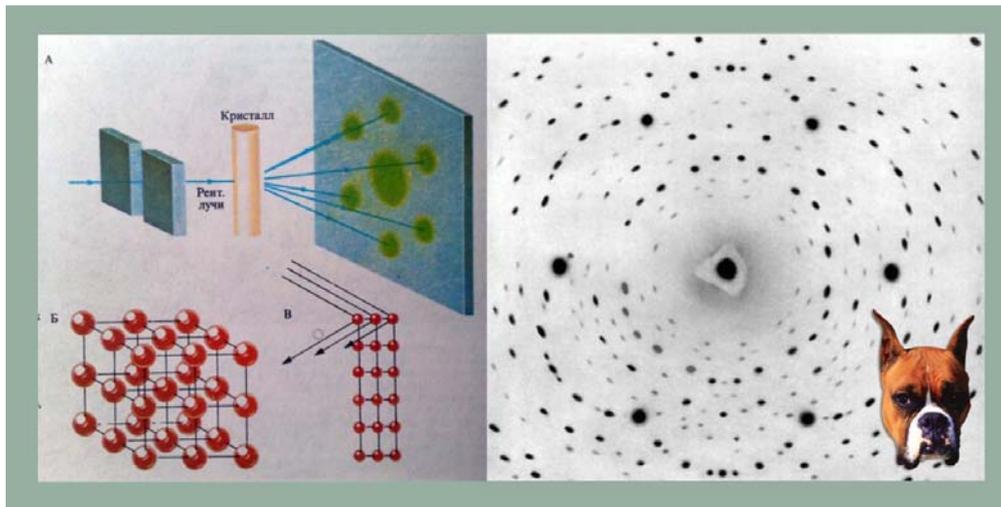
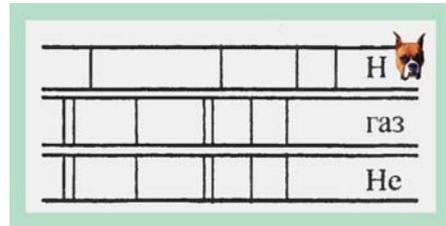


Рис. 304. Дифракция рентгеновских лучей на кристалле

1. Для исследования спектров испускания используют явление дифракции рентгеновских лучей на элементах кристаллической решётки, которая представляет собой своеобразную пространственную дифракционную решётку.

2. Расстояние между структурными элементами кристаллов (расстояние между рассеивающими центрами) одного порядка с длиной волны, связываемой с электронами, примерно 1 ангстрем ( $10^{-10}$  м).

305. На рис.305 приведен фрагмент спектра поглощения неизвестного разреженного атомарного газа, спектры поглощения атомов водорода и атомов гелия. Что собой представляет химический состав неизвестного газа?



### Решение

Рис. 305. Спектры испускания

1. Спектр испускания неизвестного газа идентичен спектру испускания гелия, каковым, по сути, и является.

306. Постоянную Планка измеряют по величине задерживающего напряжения. Приведена таблица измерений. По результатам измерений определить значение постоянной Планка.

Задерживающее напряжение $U$ , В	0,4	0,9
Частота света $\nu$ , $10^{14}$ Гц	5,5	6,9

### Решение

1. Запишем уравнение фотоэффекта для двух измерений

$$\left. \begin{aligned} h\nu_1 &= eU_1 + A; \\ h\nu_2 &= eU_2 + A; \end{aligned} \right\} h(\nu_2 - \nu_1) = e(U_2 - U_1); \quad h = \frac{e(U_2 - U_1)}{\nu_2 - \nu_1} \cong 5,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

## 14. Элементы ядерной физики

307. 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.

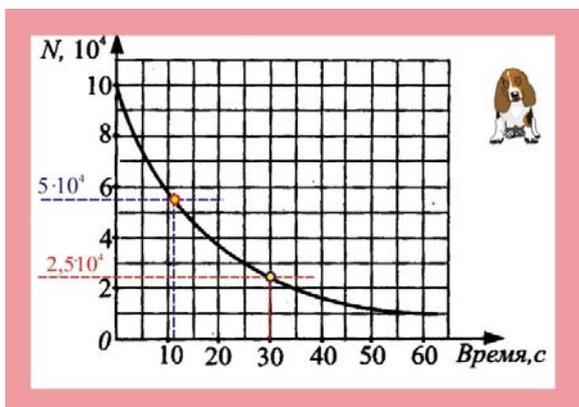


Рис. 1.22. Период полураспада

### 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.

308. Период полураспада представляет собой промежуток времени, за которое:

1. Число нуклонов в ядре уменьшается в два раза;
2. Число нейтронов в ядре уменьшается в два раза;
3. Число протонов в ядре уменьшается в два раза;
4. Распадается половина первоначального числа атомов.

### Решение

1. Количественная оценка радиоактивного распада делается в предположении, что число распавшихся ядер за достаточно малый промежуток времени, всегда пропорционально исходному числу не распавшихся ядер. Если в некоторый момент времени  $t$  число ядер данного типа было  $N(t)$ , то уменьшение общего числа ядер —  $dN$  за время  $dt$  определится следующим образом:

$$-dN = kN(t)dt,$$

где  $k = -dN/N$  — постоянная распада при  $dt = 1$ . Другими словами, постоянная радиоактивного распада равна вероятности распада одного ядра за единицу времени.

2. Разделим в дифференциальном уравнении переменные

$$\frac{dN}{N(t)} = -kdt, \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N(t)} = -k \int_0^t dt,$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kt \quad \text{или} \quad N = N_0 e^{-kt},$$

где  $N_0$  – число ядер в момент времени  $t = 0$ . Из уравнения видно, что число ядер радиоактивного исходного элемента убывает во времени по экспоненциальному закону (рис. 308). Число распадов в единицу времени определится как

$$a = -\frac{dN}{dt} = kN,$$

величина  $a$  называется активностью данного радиоактивного препарата. В качестве единицы активности используется кюри:

$$1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ событий /с.}$$

3. Эта величина соответствует примерно активности 1 г радия, активность которого соответствует 0,994 кюри. Уравнение позволяет установить взаимосвязь между постоянной распада и периодом полураспада

$$N(T) = N_0 e^{-kT} = \frac{1}{2} N_0,$$

откуда следует, что

$$e^{-kT} = \frac{1}{2}, \Rightarrow T = -\frac{1}{k} \ln \frac{1}{2} = \frac{\ln 2}{k} \cong \frac{0,693}{k}.$$

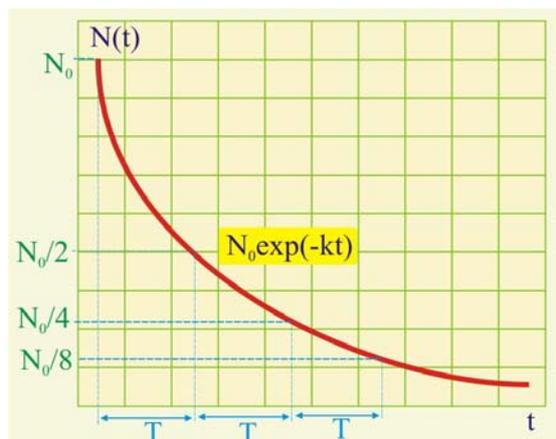


Рис. 308. Кривая полураспада

309. Какие частицы входят в состав атомных ядер элементов?

### Решение

1. Напомним, что в 1895 г. Ленард, наблюдая поток частиц в разрядной трубке, обнаружил, что заряженные частицы (электрон ещё не был открыт) проходят сквозь металлическую фольгу. Этот факт привел теоретиков и экспериментаторов в необычайное изумление, потому что проникновение «чего-то» через металлическую фольгу по существовавшим на то время представлениям, казалось, мягко говоря, не вполне вероятным.

2. Вывод напрашивался сам собой. Если это «что-то» которое регистрируют приборы и оно реагирует на электрические и магнитные поля проскальзывает сквозь металл, то, следовательно, металл не такой монолитный для этого самого «чего-то». Когда Дж. Дж. Томсон выяснил с чем имели дело ребята, возбуждавшие поток частиц в вакууме между двумя электродами с высокой разностью потенциалов, то ситуация немножко прояснилась.

3. Отрицательно заряженные частицы (электроны) вырывались из металлического катода и, будучи разогнанными электрическим полем пролетали сквозь атомы металла, не сталкиваясь с ними. Стало ясно, что либо атомы упакованы так плотно, как казалось, либо сам атом не таков, каким его представлял открыватель электрона Дж. Дж. Томсон. Получалось, что в межатомном пространстве есть некие пустоты, через которые и просачиваются пронирливые электроны. Но такого тоже не могло быть, потому что если бы ионы металла отстояли друг от друга далеко, то это была бы уже не кристаллическая струк-

тура, а жидкость или даже газ. В твёрдом состоянии между структурными элементами вещества должны быть прочные связи, которые, собственно, обеспечивают все физические свойства присущие твёрдым телам.

4. В 1911 г. Эрнст Резерфорд проверяя достоверность томсоновской модели атома, кстати своего учителя, при непосредственном участии Х. Гейгера и Э. Марсдена при анализе условий рассеяния  $\alpha$  – частиц, пришёл к выводу о несостоятельности модели шефа, и установил наличие в центре атома массивной положительно заряженной частицы, много меньшей размеров атома, позже названной ядром. Оказалось, что в ядре сосредоточено более 90% всей массы атома.

5. Исследуя накопленные экспериментальные данные в 1913г. Г. Мозли обратил внимание на то, что порядковый номер элемента в таблице Д.И. Менделеева совпадает с зарядом ядра. В те времена химики считали, что элементы надо выстраивать по атомному весу. Именно после экспериментов Мозли в обиход вошло понятие атомного номера. Это привело к некоторым изменениям в таблице Менделеева, например Ni и Co пришлось поменять местами, оставив между ними свободную клетку, в которую позже попал технеций.

6. Следующим важным шагом в ядерных исследованиях стало открытие в 1932 г. Чадвиком новой элементарной частицы, нейтрона, которая не имела электрического заряда и входила в состав атомных ядер. С этого момента стало очевидным, что ядра всех атомов состоят из  $Z$  протонов  $p$  и  $N$  нейтронов  $n$  (рис. 309.1). Пары протонов и нейтронов стали называть нуклонами, число нуклонов в ядре равно  $A = Z + N$ .

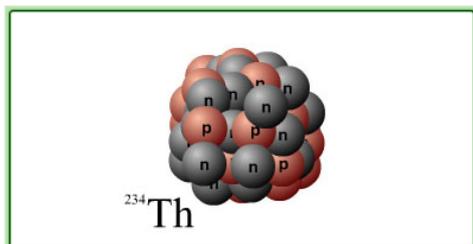


Рис. 309.1. Схема атомного ядра тория

7. Гейгер и Марсден на основании данных своих экспериментов по бомбардированию атомов золота ( $Z = 79$ )  $\alpha$  – частицами с энергией  $W_\alpha = 5$  МэВ, вычислили минимальное их сближение с ядрами, полагая взаимодействие чисто кулоновским

$$R_{\min} \approx \frac{2e \cdot Ze}{4\pi\epsilon_0 W_\alpha} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

7. Это расстояние оказалось на четыре порядка меньше размеров всего атома, что говорило о невообразимо большой плотности ядерного вещества. Так, например, для золота ( $A_{\text{Au}} \cong 197$ ) плотность ядра определится как

$$\rho_N = \frac{M}{V} = \frac{A \cdot m_n}{\frac{4}{3}\pi R_{\min}^3} \cong \frac{196 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-14})^3} \approx 10^{15} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

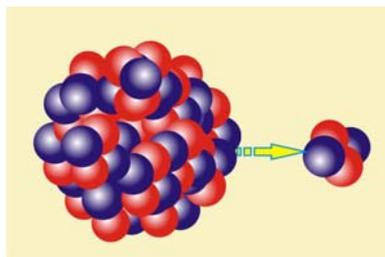


Рис. 309.2. Ядро и  $\alpha$  – частицы

8. Естественно, что вещество с такой плотностью представить в обыденной жизни затруднительно. Дело в том, что ядро атома является квантовым объектом, к которому не применимы некоторые классические представления. Эксперименты с  $\alpha$  – частицами выяснилось, что их генерируют ядра радиоактивных веществ и представляют они собой дважды ионизированные ядра гелия, потому что состоят из двух протонов и двух нейтронов (рис. 309.2). Из этого следовало, что  $\alpha$  – частицы входят в состав ядер. Используя гипотезу де Бройля можно определить длину волны, соответствующей этой частице

$$\lambda_{\alpha} = \frac{h}{\sqrt{2m_{\alpha} W_{\alpha}}} \cong 6 \cdot 10^{-15} \text{ м},$$

т.е. длина волны де Бройля сопоставима с размерами ядра, что говорит о квантовой принадлежности ядерных характеристик. Протоны и нейтроны близки по массе

$$m_p \cong 1,67239 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$p \cong + 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m_n \cong 1,67460 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

9. Оценим далее вероятность нахождения в ядре электрона, имеющего равный, практически, с протоном по модулю заряд, но обладающий в 1673 раза меньшей массой. Вот странность то, до настоящего времени не разрешенная: «Почему масса протона в 1673 раза больше, чем у электрона, а заряд по модулю одинаковый?». Найдём энергию электрона, соответствующую длине волны порядка размеров ядра

$$W_e = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{\hbar^2}{2m_e R_N^2} \cong 5 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ эВ}.$$

Потенциальная же энергия, обусловленная кулоновским взаимодействием электрона и ядра, составит

$$P_e = \frac{Ze^2}{R_N} \cong 3 \cdot 10^6 \text{ эВ},$$

другими словами  $P_e \gg W_e$ , т.е. электрон не может быть удержан в ядре кулоновскими силами.

10. Массу ядер ввиду её относительной малости принято выражать в специальных единицах, атомных единицах массы. Следует иметь в виду, что

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_{C^{12}} \cong 1,6582 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

11. На основании уравнения Оливера Хевисайда, связывающего массу и энергию, ( $E = mc^2$ ) единицу атомной массы можно представить в электрон-вольтах

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,44 \text{ МэВ}.$$

12. Разность между массой ядра в а.е.м. и его массовым числом  $A$  называется дефектом массы ядра  $\Delta$

$$\Delta = \frac{M_{Z,A}}{(1/12)M_{C^{12}}} - A.$$

**13. Протон и электрон.** При исследовании катодных лучей Дж. Дж. Томсон заметил, что в трубке, наряду с движением отрицательных зарядов возникал и обратный поток, от положительного электрода к отрицательному. Томсон назвал этот поток «положительными лучами». Резерфорд при экспериментах с  $\alpha$  – частицами, предположил, что «положительные лучи» представляют собой ядра, лишённые полностью или частично электронных оболочек. Резерфорд высказал мнение, что в состав ядер входят частицы, подобные электрону, но с положительным зарядом, однако попытки выделить этот заряд Резерфорду, как впрочем, и другим исследователям, не принесли успеха. Была надежда на ядро водорода, логично было предположить, что у водорода один электрон и ядро должно иметь такой же положительный заряд, но оказалось, что ядро водорода

существенно массивнее электрона. Напомним, что ядро водорода оказалось в 1837 раз тяжелее электрона при таком же положительном заряде.

14. Далее начались попытки выделить из ядра эту положительную частицу. Резерфорд назвал ядро водорода протоном, что значит «первый». Другие элементы имели более массивные ядра, чем у водорода. Так например, ядра гелия, имевшие массу в 4 раза большую, чем ядра водорода, должны были состоять из 4 протонов, а ядра кислорода должны были включать в свой состав 16 протонов с зарядом +16, а на самом деле заряд ядра кислорода был равен только +8.

15. Появилось неверное предположение об электронах в составе ядер, но это никак не согласовывалось с возможностью удержания электронов кулоновскими силами. Появилась даже, так называемая протонно-электронная теория, которая, кстати, объясняла появление изотопов. Предполагалось, что ядра могли иметь разное количество электронов, которые массы не меняли, а заряд был разным.

16. Например, кислород – 16 имел ядра, состоящие из 16 протонов и 8 электронов, кислород – 17 имел 17 протонов и 9 электронов, ядра кислорода – 18 содержали по 18 протонов и 10 электронов. Массовые числа ядер были соответственно равны 16, 17 и 18, а атомный вес составлял  $(18 - 8)$ ,  $(17 - 9)$ ,  $(18 - 10)$ , т.е. 8 в каждом случае. Ядро урана – 238 ( $U^{238}$ ) по этой гипотезе должно было состоять из 238 протонов и 146 электронов, а ядра  $U^{235}$  должны состоять из 235 протонов и 143 электронов. Идея была заманчива ещё и потому, что она объясняла стабильность ядер, взаимное кулоновское притяжение положительных и отрицательных зарядов казалось, было причиной стабильности и локализации. Кроме всего прочего, при радиоактивном распаде ядер, излучались  $\beta$  – частицы, которые представляют собой поток электронов, напрашивался вывод об их постоянном присутствии в ядрах.

17. Протонно-электронная теория ядер достаточно изящно объясняла саму суть радиоактивности. Чем более массивны ядра, тем больше в них содержится протонов и электронов, у элементов с числом протонов больше 84, появлялась нестабильность, имеющиеся в ядре электроны не могли локализовать частицы в пространстве, и ядро начинало излучать. По этой теории  $\alpha$  – частица представляла собой 4 протона и 2 электрона. При потере  $\alpha$  – частицы атомный номер поменяется с 4 на 2. Такое представление подтверждалось распадом  $U^{238}$  (атомный номер 92), который при испускании  $\alpha$  – частицы превращался в торий  $Th^{234}$  с атомным номером 90. При испускании электрона масса ядра практически не изменяется, но теряется часть отрицательного заряда. Получалось, что  $T^{234}$  ( $A = 90$ ) при испускании электрона превращался в протактиний  $Pa^{234}$  ( $A = 91$ ). Как видно протонно-электронная теория достаточно убедительно комментировала многие внутриядерные процессы. Неудивительно, что ей пользовались в течение примерно 15 лет. Был, однако, один, неприятный для этой теории момент, он был связан с тем, что массы ядер отличались друг от друга не на целые числа. С позиций протонно-электронной теории это было несколько странным, потому что отличались ядра на целое число протонов. Электроны ввиду их малой массы не в счёт. Получалось, что одно и то же количество протонов в разных ядрах имели различную массу.

18. **Протон и нейтрон.** В самом начале XX века перед учёными стояла очередная задача: имеет ли атомное ядро структуру, или это некое цельное образование? По сравнению с атомом ядро является чрезвычайно малым объектом, оно, имея диаметр порядка  $10^{-15}$  м, в 10 000 раз меньше диаметра атома. Оказалось, что ядро, несмотря на свои ничтожные размеры, даже по атомным мер-

кам, имеет сложную структуру. Оно состоит из частиц двух типов – протонов и нейтронов. Но до этого, как сказано выше существовала протонно-электронная теория строения ядер.

19. Задача о структуре и свойствах ядра возникла сразу после открытия Анри Беккерелем в 1896 г. радиоактивности. Напомним, что профессор Беккерель занимался действием флюоресцирующих веществ на фотопластинку, когда обнаружил, что соли урана, засвечивают фотопластинку, завернутую в чёрную бумагу. К этому времени уже было известно, что помимо электромагнитного излучения, вещество может испускать излучения, которые вызваны спонтанными превращениями атомов этих веществ в другие атомы. Радиоактивные вещества естественного происхождения испускали три типа излучений.

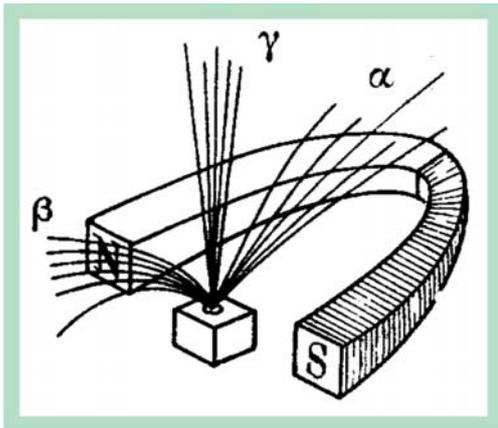


Рис. 309.3. Рисунок из диссертации Марии Склодовской-Кюри

20. Приведенный рисунок (рис 309.3) впервые появился в 1903 г. в докторской диссертации Марии Кюри.

21. Испускание  $\beta$  – лучей обнаружил в 1898 уже упомянутый Беккерель и показал, что их свойства совпадали со свойствами катодных лучей, т.е. это поток быстрых электронов.

22. Резерфорд, в 1898 г. пришел к выводу, что излучение радиоактивных материалов при распаде ядер не однородно. По проникающей способности он поделил излучение на три составных части: 1) излучение, едва проникающее

за поставленный на его пути бумажный лист; 2) излучение второго вида было способно проникнуть за алюминиевую пластинку толщиной до 3 мм; 3) третью часть излучения не удалось обнаружить только за свинцовым экраном толщиной несколько сантиметров. Особо не мудрствуя, Резерфорд присвоил им названия по трём первым буквам греческого алфавита, соответственно:  $\alpha$  – излучение;  $\beta$  – излучение и  $\gamma$  – излучение. Было обнаружено так же, что излучение расщепляется на три составных части в магнитном и электрическом поле, причём  $\gamma$  – составляющая с магнитным и электрическим полем не взаимодействует (рис. 309.4).

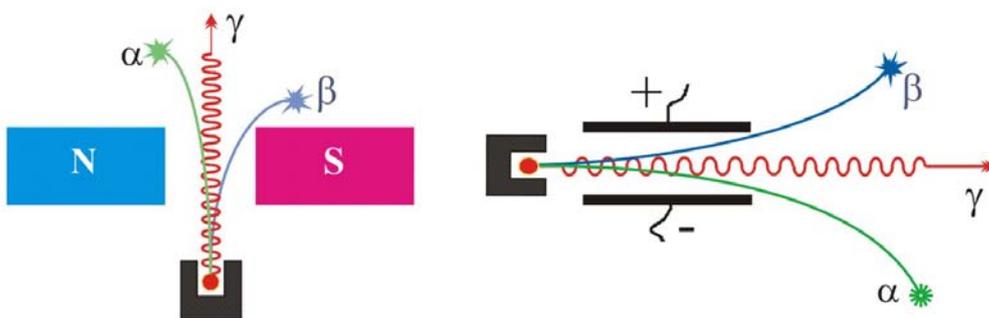


Рис. 309.4. Взаимодействие излучения с полями

310. В закрытом объёме имеется  $10^8$  атомов радиоактивного изотопа йода  $^{128}_{53}\text{I}$ , период полураспада которого  $T_{1/2} = 25$  мин. Какое количество ядер распадётся за 50 мин?

### Решение

1. В соответствии с законом радиоактивного распада, за время полупериода распадётся половина исходного числа ядер, т.е. в контролируемом объёме останется  $5 \cdot 10^7$  ядер, за последующие 25 мин распадется половина от этого количества,  $2,5 \cdot 10^7$  ядер, таким образом, за время  $\tau = 50$  мин, всего распадётся

$$N_x = 5 \cdot 10^7 + 2,5 \cdot 10^7 = 7,5 \cdot 10^7;$$

311. Установить соответствие между научными открытиями и именами учёных, которым эти открытия принадлежат.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ		ИМЕНА УЧЕНЫХ
А) электрона		1) А. Беккерель
Б) атомного ядра		2) М. Склодовская-Кюри
В) естественной радиоактивности урана		3) Э. Резерфорд
		4) Дж. Дж. Томпсон
		5) Дж. Чедвик

Рис. 311. Соответствие открытий и их авторов

### Решение

А	Б	В
4	3	1

312. Чему равен период полураспада изотопа, если за одни сутки в среднем распадается 750 атомов из 1000?

### Решение

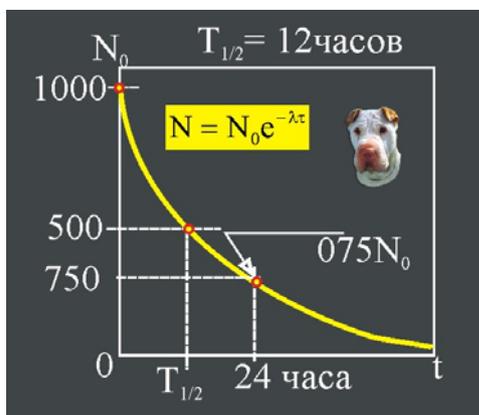


Рис. 312. Закон радиоактивного распада

1. Если исходное количество ядер в контролируемом объёме принять за  $N_0$ , то за сутки распадётся, в соответствии с законом радиоактивного распада

$$N_{24} = 0,75N_0,$$

а период полураспада соответствует времени за которое распадётся половина исходного числа ядер, то получается, что период полураспада равен времени за которое распадётся 500 ядер, т.е.

$$T_{1/2} = 12 \text{ часов.}$$

313. На графике представлены зависимости числа не распавшихся ядер  $N$  трёх радиоактивных изотопов. У какого из изотопов период полураспада минимален?

### Решение

1. Будем исчислять количество радиоактивных ядер в условных единицах. Для первого и второго вещества исходное количество ядер  $N_0$  одинаково и равно 8 условным единицам, для третьего вещества – 4.

2. За время полураспада, в соответствии с законом радиоактивного распада распадается половина начального количества ядер, для первых двух элементов это 4 условных единицы, а для третьего вещества – 2.

3. Из данных рис. 313 видно, что самым меньшим временем полураспада обладает элемент II.

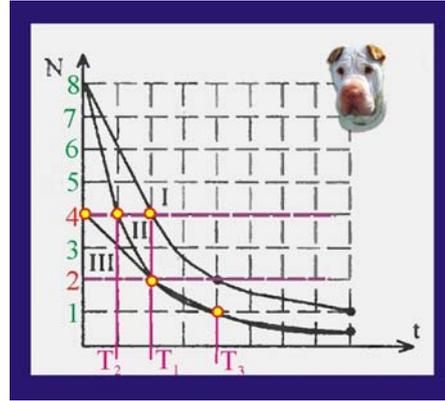


Рис. 313. Периоды полураспада

314. Радиоактивный изотоп имеет период полураспада 10 мин. Сколько ядер из 1000 этого изотопа испытывает радиоактивный распад за время  $\tau = 20$  мин?

**Решение**

1. Примем заданное первоначальное количество ядер за  $N_0 = 1000$ . За время полураспада  $T_{1/2}$  распадется половина ядер

$$N_{1/2} = \frac{N_0}{2} = 500;$$

2. За последующие 10 мин распадется ещё половина ядер от  $N_{1/2}$ , т.е. – 250 ядер, таким образом, за  $\tau = 20$  мин всего распадется 750 ядер или около того, потому что закон радиоактивного распада имеет вероятностный смысл.

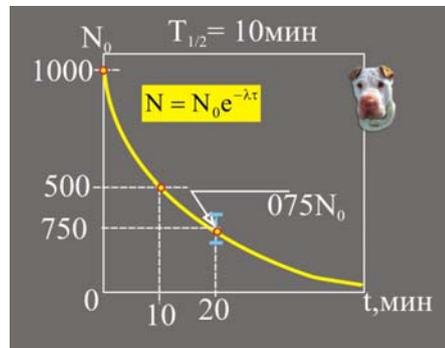


Рис. 314. Время полураспада

315. При исследованиях превращения радиоактивного вещества в двух опытах с разной массой вещества было установлено, что число частиц  $N$ , образующихся в единицу времени при радиоактивном распаде, убывает со временем в соответствии с приведёнными на рис. 315 графиками. Для объяснения различий экспериментальных кривых были сформулированы две гипотезы:

- А) Грубые погрешности во втором эксперименте;
  - Б) Вероятностный характер закона радиоактивного распада
- Какая из гипотез верна?

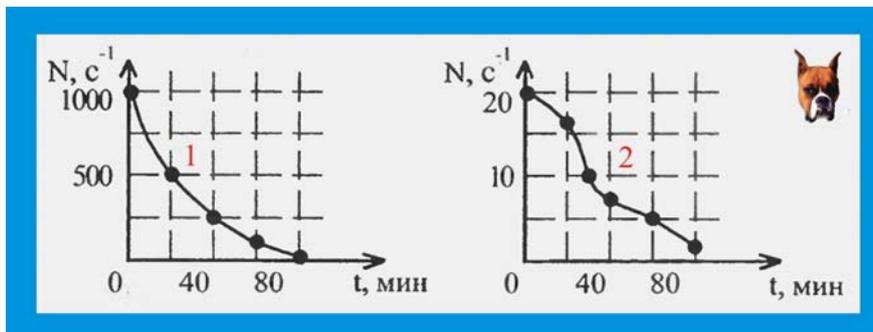


Рис. 315.1. Экспериментальные кривые радиоактивного распада

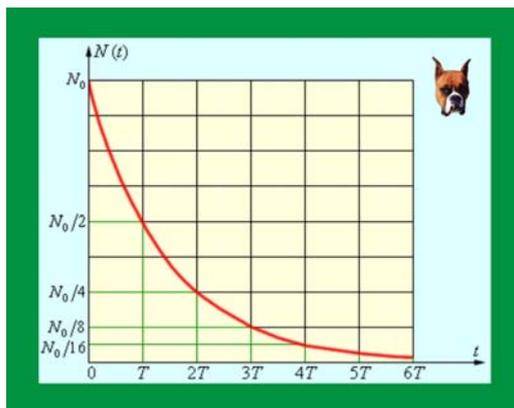


Рис. 315.2. Теоретическая кривая радиоактивного распада

### Решение

1. Процесс распада радиоактивных ядер (рис. 315.2) принято характеризовать периодом полураспада  $T_{1/2}$  и постоянной распада  $\lambda$ , которая связана с периодом полураспада уравнением

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

тогда закон радиоактивного распада запишется в виде:

$$N = N_0 e^{-\lambda t};$$

2. Постоянная радиоактивного распада определяет вероятность распада одного ядра за 1 с, т.е. эта величина подчёркивает вероятностный смысл закона.

3. В связи с вероятностным смыслом процесса распада радиоактивных ядер, на точность совпадения с экспоненциальной зависимостью влияет количество радиоактивного вещества. Можно предположить, что в случае 2 (рис.315.1) эксперименты проводились с массой вещества меньшей, чем в первом случае, поэтому имеют место большие отклонения от экспоненциальной зависимости.

316. Какая из строчек таблицы правильно отражает структуру ядра  ${}_{20}^{48}\text{Ca}$ ?

	р – число протонов	п – число нейтронов
1)	48	68
2)	48	20
3)	20	48
4)	20	28

Рис. 316. Структура ядра  ${}_{20}^{48}\text{Ca}$

### Решение

1. Принимая символику элемента  ${}^A_Z\text{X}$ , отметим, что в данном случае:

$$A = 48; \quad Z = 20,$$

т.е. массовое число равно 48, а зарядовое число равно 20, что означает, что в состав ядра входит 20 протонов, которые определяют его положительный заряд, количество нейтронов в ядре определится как:

$$N = A - Z = 28;$$

2. Структура ядра  ${}_{20}^{48}\text{Ca}$  правильно отражена в третьей строчке таблицы.

317. Два протона удерживаются в ядре за счёт:

- 1) гравитационного взаимодействия;
- 2) электромагнитного взаимодействия;
- 3) сильного взаимодействия;
- 4) слабого взаимодействия?

### Решение

**1. Ядерные силы.** Этот гипотетический тип сил отличается от электростатических и всех других известных сил. Важнейшей их особенностью является короткий радиус действия. Напомним, что электростатическое и гравитацион-

ное взаимодействие, убывает по мере возрастания расстояния, обратно пропорционально квадрату расстояния

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{1,2}^2}, \quad F_H = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{1,2}^2}.$$

2. Радиус действия этих сил всегда очень велик, по ядерным масштабам, и они подчиняются принципу суперпозиции. Таким образом, сообщив электрический заряд большим изолированным телам, мы можем в миллионы раз усилить действие отдельного электрона. Точно так же лишь в результате аддитивного сложения взаимодействий всех атомов земного шара «создается» сила тяжести, которую мы ощущаем в нашей повседневной жизни.

3. Ничего подобного не наблюдается у ядерных сил, радиус их действия не превышает радиуса ядра. В пределах этой области ядерное взаимодействие можно в грубом приближении сравнить с притяжением двух разноименных электрических зарядов величиной  $q = 3e$ . Для точечного источника сильного взаимодействия потенциал определится соотношением профессора Юкавы

$$\Phi(r) = -g \frac{e^{-\mu r}}{r},$$

где  $\mu = 1/\lambda_c$  – величина, обратная длине волны Комптона. Энергия взаимодействия двух нуклонов, таким образом, в зависимости от расстояния, примет вид

$$U = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}.$$

4. Зависимость  $U = f(r)$  для двух нуклонов приведена на рис. 317.1 Ядерные силы, в отличие от кулоновских, (красная кривая) убывают не обратно пропорционально квадрату расстояния, а значительно быстрее, по закону экспоненты; они начинают действовать лишь тогда, когда частицы почти соприкасаются.

5. В весьма фривольном приближении можно уподобить нуклоны карамельным шарикам, которые «слипаются» друг с другом при непосредственном контакте. Те, которые тают не во рту, а в руках. Опыт общения со слипшимися конфетами подсказывает, что величина связывающей их силы совершенно не зависит от того, сколько их находится в кулке.

6. При дальнейшем сближении частиц величина ядерных сил достигает некоторого предела. Если бы такого предела не существовало, ядро сжалось бы в точку, так как только при этом условии потенциальная энергия ядра стала бы равной нулю. Поскольку такой «коллапс» в действительности не происходит, потенциал не убывает неограниченно и притяжение должно уступить место сильному отталкиванию. Таким образом, в нуклоне существует некая «твердая сердцевина», или «кern», радиус которого не превышает  $4 \cdot 10^{-16}$  м.

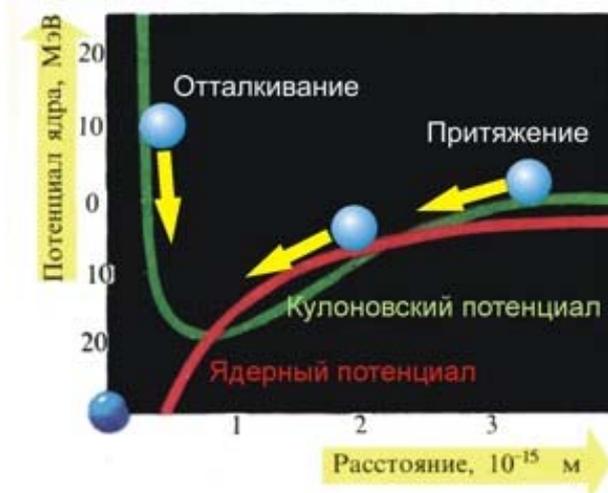


Рис.317.1. Ядерные силы взаимодействия

7. Теория ядерных сил к настоящему времени далека от завершения, однако целый ряд их качественных и количественных характеристик определён вполне надёжно.

8. Все известные к настоящему времени поля материальны, поэтому можно с уверенностью считать, что и источником ядерного поля служат материальные объекты.

9. Напомним, что источниками электромагнитного поля являются любые частицы вещества – электроны, протоны и т. д., обладающие электрическим зарядом. Такая же ситуация и с гравитационным взаимодействием. То, что обладает массой, то испытывает гравитационное взаимодействие, исключений нет.

10. Очевидно, что источниками ядерного поля являются нуклоны. Они обладают своеобразным «ядерным зарядом», одинаковым по величине и знаку у всех нуклонов (нейтрон + протон) независимо от того, обладает ли нуклон еще электрическим зарядом или нет.

11. Природа ядерных сил явно не электрического свойства, потому, что ядерные силы между частицами не зависят от того, обладают ли частицы электрическим зарядом или нет. Кроме того, ядерное взаимодействие нейтрона с нейтроном, нейтрона с протоном и двух протонов одинаково.

12. Ядерные силы, в отличие от сил между точечными или сферическими электрическими зарядами, не являются центральными. Их нельзя представлять в виде сил, действующих от одного центра сил. Это связано с наличием спина взаимодействующих частиц.

13. Ядерные силы обладают свойством насыщения, подобно химическим силам. Действительно, атомы углерода и кислорода взаимодействуют, образуя углекислый газ  $\text{CO}_2$ . Но как только, происходит соединение одного атома углерода и двух атомов кислорода, «свадьба» заканчивается, и присоединение новых атомов кислорода не происходит, – химические силы достигли насыщения.

14. Эффект насыщения ядерных сил, происходит более плавно нежели в химическом случае. Энергия, которую необходимо затратить в среднем на одну частицу, для того чтобы разбить ядро на отдельные нуклоны, начиная от гелия и до самых тяжелых ядер, меняется в пределах, не превышающих 25%.

15. **Гипотезы о возникновении ядерных сил.** Существует несколько гипотез о механизме возникновения ядерных сил. В соответствии с одной из них, внутри ядра существует поле, подчиняющееся квантовым законам, в частности это относится к полю сил, действующих между двумя нуклонами.

Возникает отнюдь не риторический вопрос, какие частицы переносят это взаимодействие? Предполагается, что переносчиками поля являются частицы – переносчики, которые, к слову сказать, пока в земных условиях не обнаружены. Но вместе с тем, объяснение такого взаимодействия через вспомогательное поле транспортных частиц не только не «притянута за уши», но и является необходимым элементом при описании других видов взаимодействия.

16. Тот факт, что эти частицы пока укрываются от экспериментаторов, совершенно не смущает теоретиков. Такой уж они упёртый народ. Допускается, что если даже окажется так, что частицы – переносчики не существуют в данный момент в «осязаемой» форме, вполне оправдано допустить их существование в виртуальной форме.

17. Схема «работы» таких частиц выглядит следующим образом: протон генерирует такую положительно заряженную частицу (рис. 317.2), которая тут же поглощается соответствующим нейтроном, которому она «предназначена». Нейтрон превращается в протон, тогда как бывший протон теряет свой заряд и становится нейтроном.

18. Затем эта «игра в кошки мышки» повторяется в обратном порядке, так, что в конце концов между двумя нуклонами происходит непрерывный обмен частицами. Таким образом, существование частицы – переносчика ограничено промежутком времени, который необходим для преодоления расстояния между двумя нуклонами (то есть радиуса действия ядерных сил). Отсюда  $\Delta t \cong r_i/c$  при условии, что частица движется со скоростью света  $c$ . Если  $r_i \cong 1 \cdot 10^{-15}$  м,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, то  $\Delta t \cong 3,3 \cdot 10^{-24}$  с.

19. Внутрядерные силы относятся к силам сильного взаимодействия и являются своеобразным «склеивающим» фактором, удерживающим протоны и нейтроны в ядре.

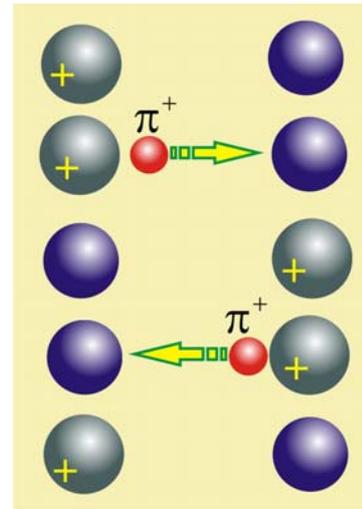


Рис.317.2. Переносчики поля  $\pi$ -мезоны

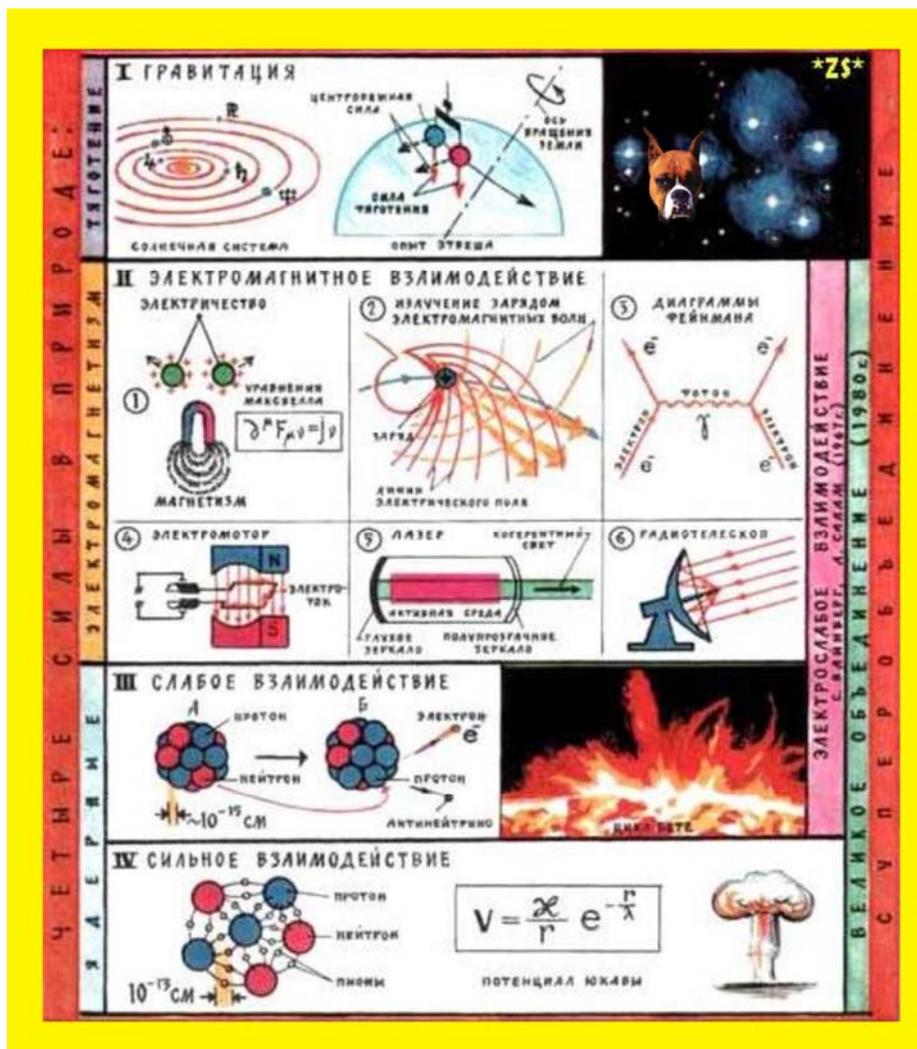


Рис. 317.3. Классификация фундаментальных взаимодействий

318. Как изменяется заряд и массовое число радиоактивного ядра в результате его  $\beta^-$ -распада:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится?

**Решение**

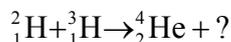
1. При  $\beta^-$ -распаде слабое взаимодействие превращает нейтрон в протон при этом испускаются электрон и антинейтрино, например, при превращении изотопа цезия в изотоп бария



таким образом, заряд увеличивается на единицу, а массовое число не меняется в виду вопиющей малости массы исторгаемых частиц.

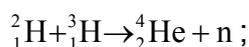
---

319. Какая вторая частица образуется в ходе реакции термоядерного синтеза



**Решение**

1. Заданная ядерная реакция описывает процесс соединения ядра дейтерия с ядром трития, в результате чего образуется ядро гелия и испускается нейтрон, потому что заряд итогового ядра равен сумме зарядов соединяющихся ядер, а испускаемой является частица с массой равной единице и не несущая на себе заряд, это нейтрон

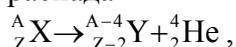


320. Как изменяется при  $\alpha$ -распаде следующие характеристики атомного ядра: массовое число ядра, заряд ядра, число протонов в ядре?

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

**Решение**

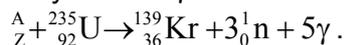
1. Правило смещения для  $\alpha$ -распада



массовое число уменьшается на 4 единицы, заряд тоже уменьшается на 2 единицы, именно количество протонов определяет заряд ядра, протонов станет на 2 меньше.

---

321. В результате столкновения ядра с частицей произошло деление ядра урана, сопровождающееся излучением  $\gamma$ -кванта в соответствии с уравнением



Какая частица проникла в ядро урана?

**Решение**

1. Теория расщепления ядра была впервые разработана в 1939 г. Н. Бором и Д. Уилером. Независимо от них и даже несколько раньше эту теорию изложил

коллегам Я. И. Френкель. В основу обеих теорий была положена капельная модель ядра.

2. Капельная модель, как и все начальные модели, не в состоянии описать все сложные нюансы процесса деления. Некоторые стороны этого явления не вписываются в капельную теорию, а ряд экспериментальных фактов противоречит параметрам модели. Но, тем не менее, изучение колебаний жидкой капли позволило установить важные закономерности, применимые для ядра.

3. В обычном своём состоянии ядро урана  $^{235}\text{U}$  постоянно выбрасывает  $\alpha$  – частицы, т.е. оно радиоактивно, период полного распада составляет, примерно  $7,1 \cdot 10^8$  лет.

4. Ядро, подобно большой капле воды, подвержено действию сил поверхностного натяжения. Деформации меньшие критических, не вызывают распада капли. Вследствие внутренней упругости ядро совершает **капиллярные колебания** (рис. 321.1). Процесс подобных колебаний формы капель наблюдается при их попадании на горячие поверхности. Под каплями образуется паровая подушка, препятствующая их непосредственному соприкосновению с горячей поверхностью (явление Лейденфроста). Капли на поверхности плиты совершают замысловатый «танец», сохраняя, тем не менее, целостность. В каплях воды могут происходить процессы, не описываемые теорией Лейденфроста.

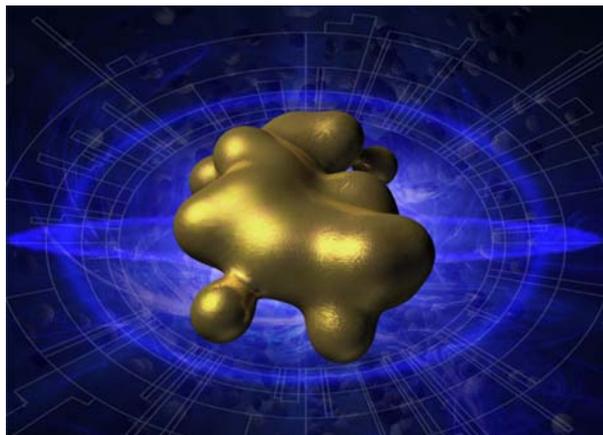


Рис. 321.1. Капиллярные колебания капельной модели атомного ядра

5. Вода всегда содержит мельчайшие парогазовые пузырьки, которые при перегреве резко увеличивают свой объём и буквально разносят каплю на куски. Наиболее применима для моделирования ядерных процессов капля воды, взвешенная в масле. При достижении вполне определённой температуры капли, вследствие образования внутри капли конкурирующей фазы, её форма начинает меняться, капля пульсирует принимая форму вытянутого эллипсоида или чечевицы, а затем, как правило распадается на две.

6. Колебания формы ядерной капли происходят при одновременном проявлении двух типов сил: кулоновских сил отталкивания и ядерных сил притяжения. В обычном состоянии ядра  $^{235}\text{U}$  или  $^{233}\text{U}$  между этими силами имеет место динамическое равновесие, но ядро находится, как бы, в «перегретом, метастабильном состоянии».

7. При попадании в ядро медленного нейтрона (рис. 321.2) (быстрые нейтроны не задерживаются в ядре, пролетая его насквозь) высвобождается энергия связи порядка 7,5 МэВ. Этой энергии оказывается вполне достаточно для перевода ядра в возбуждённое состояние. Ядро начинает совершать очень интенсивные колебания. Если подведенная энергия превышает значение работы деформации, необходимое для пре-

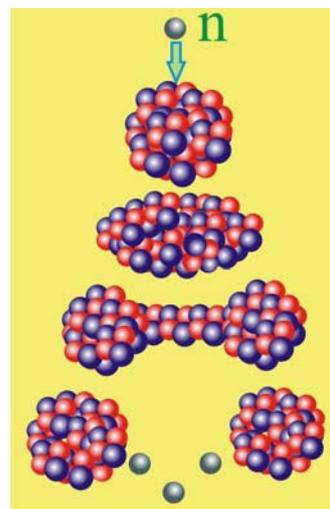


Рис. 321.2 Распад атомного ядра урана

одоления границы устойчивости, ядро распадается на две части: с помощью трековой камеры можно видеть, как они обе разлетаются в диаметрально противоположных направлениях со скоростями, составляющими около  $v = 1/20$  скорости света. Энергию, высвобождающуюся при таком акте деления можно оценить, используя закон Кулона, она составляет примерно 200 МэВ.

8. Теория утверждает, что методом бомбардировки нейтронами возможно расщепление только относительно крупных и нестабильных ядер  $U^{233}$ ,  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ . Энергии таких нейтронов совершенно недостаточно для деления стабильных ядер, например свинца. В природном уране, добываемом на рудниках, преобладает  $^{238}_{92}U$ , но расщепляется пополам лишь его изотоп  $U^{235}$ , содержание которого не превышает 0,7%.

9. Таким образом, ядро урана  $^{236}_{92}U$  превращается в ядро изотопа цезия  $^{140}_{55}Cs$ , которое, распадаясь в течение 66 с, становится ядром изотопа бария  $^{140}_{56}Ba$ . Этот изотоп тоже радиоактивен, в течение 12,8 дней он становится одним из изотопов лантана  $^{140}_{57}La$ , и наконец, спустя ещё 40 часов превращается в церий  $^{140}_{58}Ce$ . Кроме рассмотренной последовательности распада может наблюдаться схема показанная на рис 321.3 (нижняя последовательность). Ядро  $^{236}_{92}U$  распадается на ядра изотопа рубидия  $^{94}_{37}Rb$ , которое, живёт несколько микросекунд, становясь изотопом стронция  $^{94}_{38}Sr$ . Стронций, будучи радиоактивным, всего за 2 минуты превращается в изотоп йода  $^{94}_{53}I$  и ещё за 20 минут изотоп йода становится цирконием  $^{94}_{40}Zr$ . При каждом акте деления высвобождаются 2 – 3 нейтрона, вылетающие с большой скоростью, так называемые, быстрые нейтроны. Как видно, новые образования при ядерном делении получаются в возбужденном состоянии, и их внутренняя энергия высвобождается в первую очередь путем испарения нейтронов и в виде  $\gamma$  – излучения.

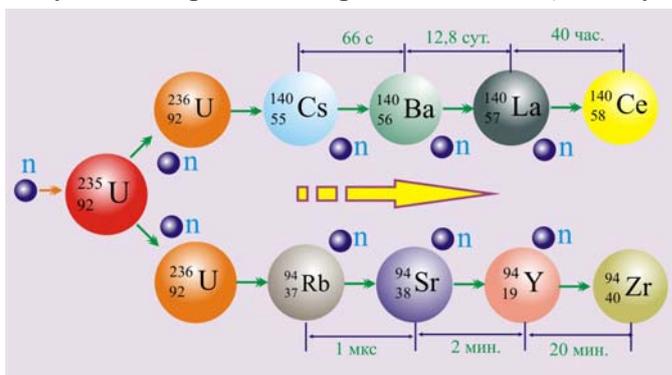


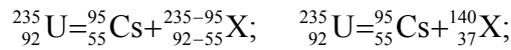
Рис. 321.3. Схема распада ядер урана

Основными продуктами процесса деления являются, таким образом, два примерно равных ядра, несколько нейтронов и  $\gamma$  – квантов.

322. Каким ещё осколком сопровождается деление ядра урана  $^{235}_{92}U$ , если одним из осколков является ядро цезия  $^{95}_{55}Cs$  ?

**Решение**

1. Для делящегося ядра изотопа урана справедлив закон сохранения заряда и массовых чисел: сумма зарядов (массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции



2. Вторым осколком ядра является любимый народом **рубидий**  ${}_{55}^{95}\text{Rb}$ .

323. . В ядерных реакторах осуществляется:

1. Управляемая цепная реакция деления;
2. Управляемая реакция синтеза ядер;
3. Неуправляемая цепная реакция деления ядер;
4. Неуправляемая реакция синтеза ядер?

### Решение

1. Контролируемая и самоуправляемая цепная ядерная реакция деления тяжёлых ядер под действием нейтронов лежит в основе работы, практически, всех современных ядерных реакторов (рис. 323.1).

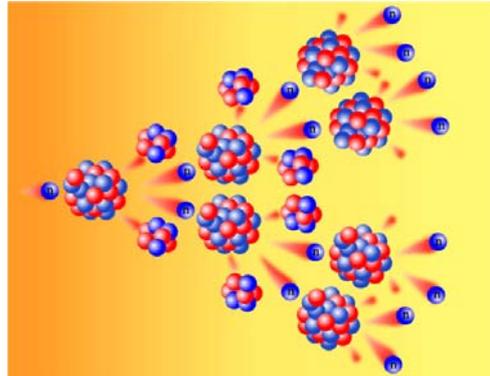


Рис. 323.1. Схема цепной реакции

2. К управляемому делению способны такие нуклиды как: уран  $\text{U}^{233}$ , уран  $\text{U}^{235}$ , плутоний  $\text{P}^{239}$  и плутоний  $\text{P}^{241}$ .

3. В естественном состоянии, в природной среде, существует только  $\text{U}^{235}$ , который составляет только 0,7% от всех имеющихся запасов. В природе в основном (99,3%) встречается уран  $\text{U}^{238}$ , ядра которого не способны к участию в управляемой цепной реакции.

4. Современные ядерные реакторы в большинстве своём используют для запуска и поддержания цепной реакции тепловые нейтроны, которыми бомбардируют ядра урана  $\text{U}^{235}$ . Для того чтобы в качестве топлива использовать другие тяжёлые нуклиды  $\{\text{U}^{233}, \text{P}^{239}, \text{P}^{241}\}$  необходимо применять реакторы – размножители, в которых при поглощении нейтронов ядрами  $\text{U}^{238}$  или тория  $\text{Th}^{232}$  образуются в больших количествах делящийся изотоп плутоний  $\text{P}^{239}$  или уран  $\text{U}^{233}$ .

5. Уран является едва ли не самым распространённым химическим элементом в земной коре (литосфере). Урана в литосфере нашей планеты содержится 1 г на 1 т почвы. По оценкам геологов только в континентальной зоне планеты содержится ориентировочно 200 млрд. т урана. Существующие в наше время технологии переработки и обогащения урана, позволяют использовать только около 0,1% массы добываемой руды. Добыча 1 кг  $\text{U}_3\text{O}_8$  обходится в ценах 2000 г. по 70 долларов за кг. В современных ядерных энергетических устройствах на тепловых нейтронах в качестве топлива используется природный уран ( $\approx 99,3\% \text{U}^{238} + 0,7\% \text{U}^{235}$ ) или обогащённый уран  $\text{U}^{235}$ .

6. На рис. 323.2 приведена упрощённая схема современного ядерного реактора на медленных нейтронах. В качестве источника энергии в таких устройствах используется, как правило, природный уран, состоящий из смеси трёх изотопов урана:  $\text{U}^{238}$  (99,28%),  $\text{U}^{235}$  (0,7%),  $\text{U}^{234}$  (0,006%). Ядра урана 235 при захвате медленного нейтрона распадаются, выделяя энергию и по два или три

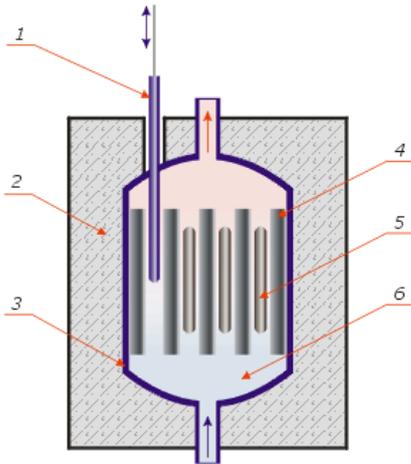


Рис. 323.2. Схема ядерного реактора: 1 – управляющий стержень, 2 – биологическая защита, 3 – теплоизоляция, 4 – замедлители нейтронов, 5 – ядерное топливо, 6 – теплоноситель,

новых нейтрона. В принципе, АЭС отличается от ТЭС только способом получения тепла. В АЭС возбуждают ядерную реакцию в топливных тепловыделяющих элементах 5, выделяемое тепло отбирается из активной зоны теплоносителем 6 и далее после теплообменника подаётся на турбину по классической схеме. Превращение вещества на ядерном уровне сопровождается выделением имеющейся в нём свободной энергии. В рассматриваемом случае имеет место, так называемая, экзоэнергетическая реакция, характеризующаяся тем, что в следующем за возбужденным состоянием энергии выделяется больше, чем требуется для генерации процесса. В случае молекулярных превращений, т.е. процессов на уровне электронных оболочек (химические реакции)

повышение температуры реагирующих продуктов происходит на сотни и единицы тысяч градусов, например, при окислении взрывчатых веществ. В ядерных реакциях температура повышается на миллионы градусов, что свидетельствует о значительном энергетическом выходе реакции.

7. Состояние ядерного реактора принято характеризовать эффективным коэффициентом размножения нейтронов  $k$  или реактивностью реактора  $\rho$ , которые связаны простым соотношением

$$\rho = \frac{k-1}{k} = 1 - \frac{1}{k}.$$

8. При  $k > 1$  количество делящихся в единицу времени материнских ядер увеличивается, реактор находится в надкритическом состоянии, реактивность реактора  $\rho > 0$ . При  $k < 1$  реакция затухает, реактор находится в подкритическом состоянии,  $\rho < 0$ . Рабочий режим реактора характеризуется  $k = 1$ ,  $\rho = 0$ , число актов деления ядер в единицу времени постоянно, реактор находится в стабильном критическом состоянии. Условие критичности реактора определяется уравнением

$$k = k_0 \omega,$$

где  $\omega$  – доля полного числа образующихся в реакторе нейтронов, поглощённых в активной зоне,  $k_0$  – коэффициент размножения нейтронов в активной зоне бесконечно больших размеров, определяемый уравнением

$$k_0 = \mu \Phi \theta \eta,$$

где  $\mu$  – коэффициент размножения,  $\phi$  – вероятность избежания резонансного захвата,  $\theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов,  $\eta$  – выход нейтронов за один захват. Рабочий режим характеризуется  $k < k_0$ , если  $k_0 < 1$ , то цепная самопод-



Рис. 323.3. Активная зона реактора

держивающаяся реакция в данном веществе не возможна. Величина  $k_0$  определяет принципиальную возможность среды размножать нейтроны.

324. Ядерной реакцией деления является:

**Решение**

1. Реакция деления предполагает распад материнского ядра на несколько дочерних ядер, в сточке три ядро изотопа фермия распадается на два дочерних ядра: ядро изотопа сурьмы и ядро изотопа индия. В остальных случаях ядерные реакции не являются реакциями деления.

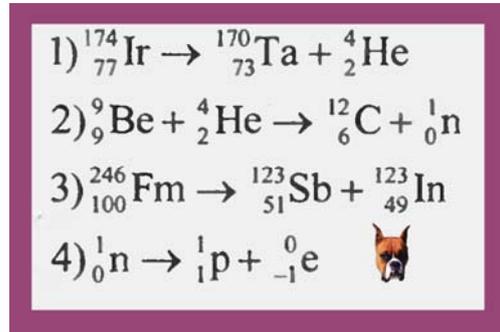


Рис. 324. Ядерные реакции

325. Дана одна из возможных реакций радиоактивного распада урана



при этом осколки имеют кинетическую энергию порядка 200 МэВ. Какое из утверждений справедливо?

- А) Сумма зарядов ядер осколков точно равна сумме заряда ядра урана;
- Б) Масса осколков точно равна массе исходного атома.

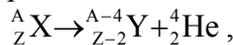
**Решение**

1. Закон сохранения электрических зарядов и массовых чисел гласит: сумма зарядов (массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Кроме того, сумма масс ядер и частиц, получающихся в результате реакции меньше массы материнского ядра (дефект массы), величина  $\Delta m$  определяет энергетический выход ядерной реакции. В этой связи, верным является только утверждение А.

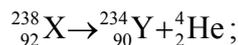
326. Какие заряд  $Z$  и массовое число  $A$  будет иметь ядро элемента, получившегося из ядра изотопа  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после одного  $\alpha$ -распада и двух  $\beta$ -распадов?

**Решение**

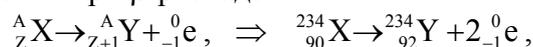
1. Правило смещения для  $\alpha$ -распада



массовое число уменьшается на 4 единицы, заряд тоже уменьшается на 2 единицы



2. Правило смещения при  $\beta$ -распаде



таким образом:  $Z = 92, A = 234$ .

2	II	Li ЛИТИЙ 7 <sub>03</sub> 6 <sub>7,4</sub>	3	Be БЕРИЛЛИЙ 9 <sub>100</sub>	4	5	6	B БОР 11 <sub>80</sub> 10 <sub>20</sub>
3	III	Na НАТРИЙ 23 <sub>100</sub>	11	Mg МАГНИЙ 24 <sub>70</sub> 26 <sub>11</sub> 25 <sub>10</sub>	12	13	14	Al АЛЮМИНИЙ 27 <sub>100</sub>
4	IV	K КАЛИЙ 39 <sub>63</sub> 41 <sub>6,7</sub>	19	Ca КАЛЬЦИЙ 40 <sub>97</sub> 44 <sub>2,1</sub>	20	21	22	Sc СКАНДИЙ 45 <sub>100</sub>
	V	29 Cu МЕДЬ 63 <sub>60</sub> 65 <sub>31</sub>	30	Zn ЦИНК 64 <sub>40</sub> 66 <sub>28</sub> 68 <sub>19</sub>	31	32	33	Ga ГАЛЛИЙ 69 <sub>60</sub> 71 <sub>40</sub>

Рис. 327. Фрагмент таблицы Д.И. Менделеева

327. На рис. 327 приведён фрагмент Периодической системы элементов Дмитрия Ивановича Менделеева. Под названием элемента приведены массовые числа его основных стабильных изотопов, нижний индекс около массового числа указывает в процентах распространённость элемента в природе. Определить число протонов и нейтронов в ядре самого распространённого изотопа меди.

### Решение

1. Порядковое число элемента равно числу протонов в его ядре, для меди  $Z = 29$ , число нейтронов ядре определяется как:

$$N = A - Z = 63 - 29 = 34.$$

328. Какое из приведенных соотношений справедливо для полных энергий свободных протонов и нейтронов и составленного из них ядра:

- 1)  $E_{\text{я}} = E_{\text{p}} + E_{\text{n}}$ ; 2)  $E_{\text{я}} > E_{\text{p}} + E_{\text{n}}$ ; 3)  $E_{\text{я}} < E_{\text{p}} + E_{\text{n}}$ ;

### Решение

1. Вследствие дефекта массы

$$\Delta m = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{я}}],$$

энергия ядра больше, чем суммарная энергия свободных протонов и нейтронов, входящих в его состав.

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

### Решение

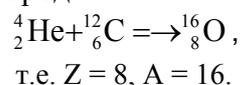
1. Увеличение энергии электрона происходит при поглощении им фотона. Величина изменения энергии электрона должна быть равна энергии фотона

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

330. В результате ядерной реакции  ${}^4_2\text{He} + {}^{12}_6\text{C}$  получается ядро элемента с массовым числом  $A$  и зарядом ядра  $Z$ . Ядро какого химического элемента получилось в результате реакции?

### Решение

1. В данном случае ядра углерода бомбардируются  $\alpha$  – частицами, в результате чего образуются ядра кислорода



## 15. Методы научного познания

331. Истинность теории базируется на:

- А) достоверности экспериментов, лежащих в её основе;
- Б) экспериментальном подтверждении выводов из неё?

### Решение

1. Истинность теории базируется как на утверждении А, так и на утверждении Б, в качестве примера процесса подтверждения теории экспериментом и дальнейшего развития на основе полученных данных дальнейших теоретических представлений, может служить развитие модели атомной структуры вещества.

2. Напомним, что впервые идея структурного строения материи была высказана ещё в V в. до с.л. Демокритом или кем-то из его учеников, но гениальная догадка древнего грека была предана забвению, потому что была высказана не в своё время и теоретически не могла быть подтверждена экспериментом, даже косвенно.

3. Следующая научно обоснованная попытка описания структуры атома была сделана в конце XIX в. Дж. Дж. Томсоном, который предложил считать атом сферой положительно заряженного вещества, в объёме которого равномерно распределены электроны в соответствующем количестве (рис. 331 фрагмент 1).

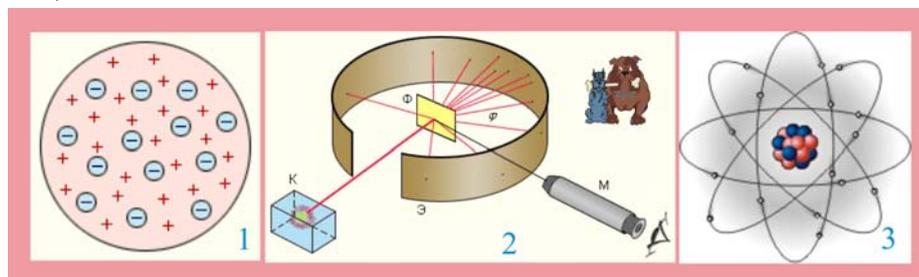


Рис. 331. Становление и экспериментальная проверка моделей атомов

4. Проверку идеи Томсона осуществил Эрнст Резерфорд в 1910 г (фрагмент 2), однако результаты не подтвердили правомерности первой модели, но позволили прийти к идее существования ядра и сформулировать качественную теорию планетарной модели атома (фрагмент 3). Планетарная модель атома в дальнейшем уточнялась и совершенствовалась в части строения электронных оболочек.

332. Космонавты исследовали зависимость силы тяжести от массы тела на исследуемой ими планете. Результаты сведены в таблице.

m, кг	1	2,5	3	3,5	4	4,5
F, Н	2,5	10	12,5	15	17,5	18,5

Погрешность измерения массы составляет 0,1 кг, силы – 1,5. Н. Какой из графиков построен правильно, с учётом всех результатов измерений и их погрешностей?

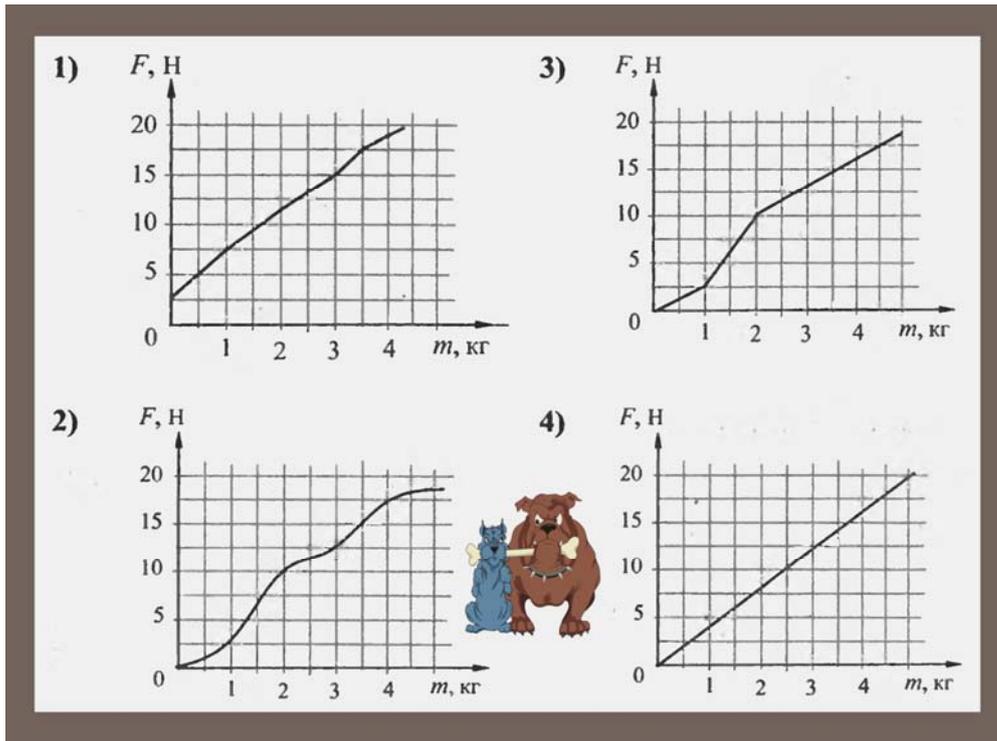


Рис. 332.1. Представление экспериментальных результатов

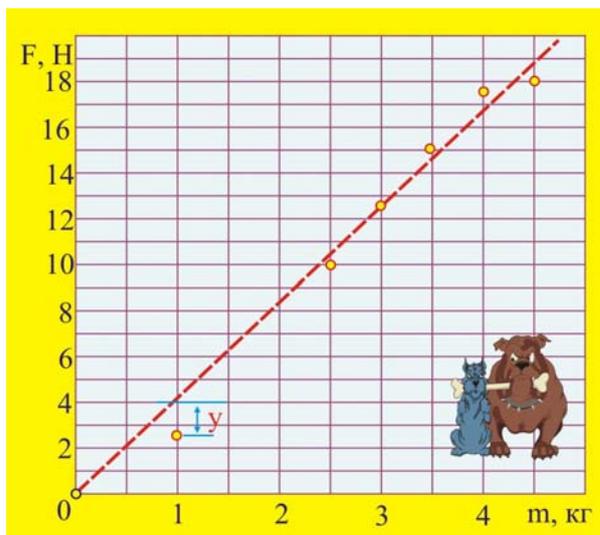


Рис. 332.2. Оценка достоверности

**Решение**

1. Построим по экспериментальным точкам исследуемую зависимость, отметив, что при  $m = 0$   $F = 0$ .

2. Максимальное отклонение у при таком представлении результатов составляет по вертикальной оси 1,5 Н, что не превосходит погрешности измерений.

3. Наиболее достоверным является график 4 рис. 332.1.

333. В таблице приведены результаты измерений запирающего напряжения для фотоэлементов при двух различных значениях частоты света,  $\nu_{кр}$  – соответствует красной границе фотоэффекта.

Частота падающего света $\nu$	$2\nu_{кр}$	$3\nu_{кр}$
Запирающее напряжение $U_3$	?	$2U_0$

Определить величину запирающего напряжения, пропущенного в таблице.

**Решение**

1. Запишем уравнение фотоэффекта для двух измерений

$$\left. \begin{array}{l} hv_1 = eU_1 + A; \\ hv_2 = eU_2 + A; \end{array} \right\} A = hv_{\text{кр}}; \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 2hv_{\text{кр}} = eU_X + hv_{\text{кр}}; \\ 3hv_{\text{кр}} = 2eU_X + hv_{\text{кр}}; \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} hv_{\text{кр}} = eU_X; \\ 2hv_{\text{кр}} = 2eU_0; \end{array} \right\};$$

$$\frac{1}{2} = \frac{U_X}{2U_0}; \Rightarrow U_X = U_0;$$

334. Резиновый шар, наполненный воздухом солнечным деньком опустили в зеро на глубину  $h = 1$  м. Через некоторое время обнаружилось, что объём шарика уменьшился в  $\zeta = 5$  раз. Какие из приведённых аргументов требуют экспериментальной проверки?

- А. Воздух в шарике сжался за счёт понижения температуры;
- Б. Давление снаружи шарика возросло;
- В. Оболочка шарика изменила упругие свойства за счёт снижения температуры;
- Г. Оболочка потеряла герметичность.

### Решение

1. Начнём с конца. Потеря герметичности может быть в воде определена без специальных экспериментов, подобно проверки камеры велосипеда на прокол. Есть пузырьки, – потеряла герметичность. А нет – так нет.

2. Изменение объёма в зависимости от температуры и внешнего давления можно описать законом состояния воздуха внутри шарика, считая его идеальным газом. Запишем уравнение Клайперноа-Менделеева для двух состояний воздуха на поверхности и под водой

$$\left. \begin{array}{l} p_0 V_0 = \nu RT_1; \\ (p_0 + \rho gh) \frac{V_0}{5} = \nu RT_2; \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 10^5 V_0 = \nu RT_1; \\ 1,1 \cdot 10^5 \frac{V_0}{5} = \nu RT_2; \end{array} \right\} 4,5 = \frac{T_1}{T_2}; \quad T_2 \cong \frac{T_1}{4,5};$$

3. Если на поверхности температура воздуха в шарике была  $30^\circ\text{C}$ , то температура воды должна быть порядка  $7^\circ\text{C}$ , если это так, то данные, приведенные в условии задачи верны.

335. Законы геометрической оптики применимы для описания следующих явлений:

- 1) образование тени от дома;
- 2) образование светлого пятна в центре тени маленького шарика;
- 3) образование радужных плёнок;
- 4) прохождение света через два поляризатора, только при определённой их ориентации?

### Решение

1. Законы геометрической оптики (прямолинейного распространения) позволяют объяснить только образование тени от предметов, в частности от дома. В геометрической оптике оперируют световыми лучами, под которыми понимается прямолинейное распространение энергии электромагнитной волны.

2. Остальные явления законами геометрической оптики не объяснимы, потому что все они имеют волновую природу, когда свет рассматривается как электромагнитная волна, демонстрирующая явления дифракции, интерференции и поляризации.

336. По какой из приведённых формул можно рассчитать силу гравитационного притяжения между двумя кораблями одинаковой массы?

1)  $F = Gm^2/b^2$   
 2)  $F = Gm^2/4b^2$   
 3)  $F = Gm^2/16b^2$   
 4) ни по одной из указанных формул

Рис. 336. Возможность применения формулы

**Решение**

1. Закон гравитации Ньютона гласит: сила, с которой две материальные точки притягивают одна другую, прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Корабли не являются точками, потому что расстояние между ними соизмеримо с их размерами. Если корабли рассматривать как объёмные тела, то необходимо располагать информацией о расположении их центров масс, и в качестве характерного расстояния рассматривать расстояние между центрами масс, которое из условия задачи определить невозможно. Справедлив пункт 4, т.е. по приведённым формулам рассчитать силу гравитационного притяжения невозможно. И ко всему прочему из условия задачи не ясно, о каких кораблях идёт речь, о морских или космических. на эти средства передвижения будут действовать совершенно разные системы сил.

337. Установить соответствие между научными открытиями и именами учёных, которым эти открытия принадлежат.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ	ИМЕНА УЧЕНЫХ
А) закон, определяющий тепловое действие электрического тока	1) А. Ампер
Б) закон магнитного взаимодействия проводников с током	2) Э.Х. Ленц
В) закон, связывающий силу тока в проводнике и напряжение на концах проводника	3) Ш. Кулон
	4) Г. Ом
	5) М. Фарадей

Рис. 337. Соответствие открытий и авторов

**Решение**

А	Б	В
2	1	4

338. Шарик катится по прямолинейному желобу. На рис. 338 показано изменение координаты шарика в инерциальной системе координат. На основании графика можно утверждать:

- 1) первые 2 с шарик покоился, а затем двигался с увеличивающейся по модулю скоростью;
- 2) на шарик действовала всё увеличивающаяся сила;

3) первые 2 с скорость шарика не менялась, а затем её модуль постепенно уменьшался;

4) скорость шарика постоянно уменьшалась?

**Решение**

1. В течение первых 2 с шарик покоился, т.к. его координата в течение этого времени не менялась, а затем он начал двигаться ускоренно

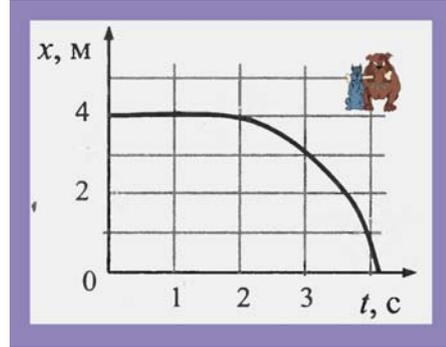


Рис. 338. Движение шарика

$$x(t) = x_0 - \frac{at^2}{2}; \quad v(t) = at;$$

2. Верным является утверждение №1: первые 2 с шарик покоился, а потом двигался с увеличивающейся по модулю скоростью, хотя график нарисован примерно.

339. Установить соответствие между именами учёных и научными открытиями, совершёнными ими.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ	ИМЕНА УЧЕНЫХ
А) открытие явления непрерывного беспорядочного движения частиц, взвешенных в жидкости или газе	1) Архимед
Б) открытие атмосферного давления	2) Э. Торричелли
В) открытие закона о передаче давления жидкостями и газами	3) Б. Паскаль
	4) Р. Броун
	5) А. Эйнштейн



Рис. 339. Соответствие открытий и авторов

**Решение**

А	Б	В
4	2	3

340. На графике представлены результаты измерения длины пружины при различных значениях массы грузов, лежащих на чашке пружинных весов. С учётом погрешностей ( $\Delta m = \pm 1$  г,  $\Delta \ell = \pm 0,2$  см) определить жёсткость пружины.

**Решение**

1. По сути дела в данном эксперименте проверяется закон Гука

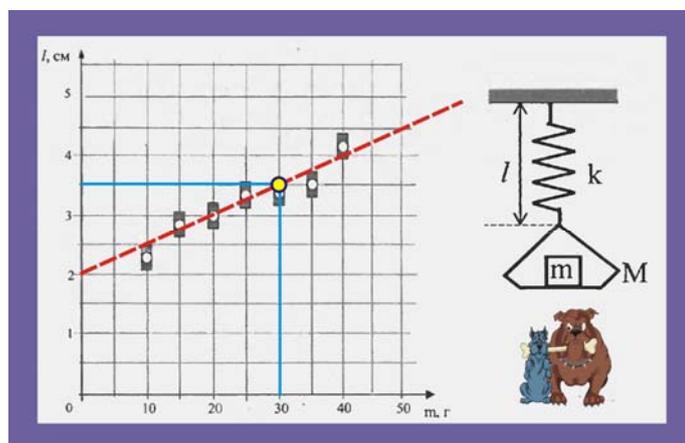


Рис. 340. Измерение жёсткости пружины

$$mg = k\Delta x, \quad \Delta x = \ell - \ell_0,$$

где  $m$  – масса груза на чашке весов,  $\Delta x$  – удлинение пружины,  $\ell$  – измеряемая длина пружины,  $\ell_0$  – длина недеформированной пружины, которая определяется по заданному экспериментальному графику.

2. Поскольку зависимость силы упругости от удлинения пружины линейная, то в качестве рабочей области экспериментальных данных нужно выбрать точки, наилучшим образом располагающиеся на прямой линии, причём с учётом заданной точности изменений, чтобы выбранная прямая лежала в области затемнённых прямоугольников, изображающих точность измерений. Пунктирная прямая этому условию соответствует наилучшим образом.

3. Выбранная прямая на оси удлинений отсекает значение  $\ell_0 \cong 2$  см, закон Гука можно переписать следующим образом:

$$mg = k(\ell - \ell_0); \Rightarrow k = \frac{mg}{\ell - \ell_0};$$

4. Для удобства вычислений выберем  $m = 30$  г, чему соответствует удлинение  $\ell = 3,5$  см, тогда:

$$k \approx \frac{0,3}{3,5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}} \approx 20 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

341. С использованием пружины, бруска и нити (рис. А) исследовалась зависимость тормозного пути  $S_T$  от растяжения пружины  $x$ . Результаты исследования представлены на рис. Б. На основе эксперимента укажите формулу, позволяющую предсказать значение  $S$  при известной деформации  $x$ .

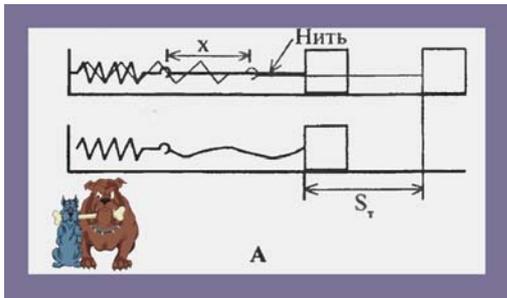


Рис. 341.А. Измерительная установка

### Решение

1. Соединим экспериментальные точки плавной кривой и обнаружим, что экспериментальная зависимость представляет собой функцию вида

$$S = kx^2,$$

т.е. – параболу.

2. По одной из экспериментальных точек определим значение коэффициента  $k$

$$k = \frac{S_T}{x^2} \cong \frac{45 \cdot 10^{-2}}{0,3^2} \cong 5;$$

Уравнение тормозного пути:  $S_T = 5x^2$ .

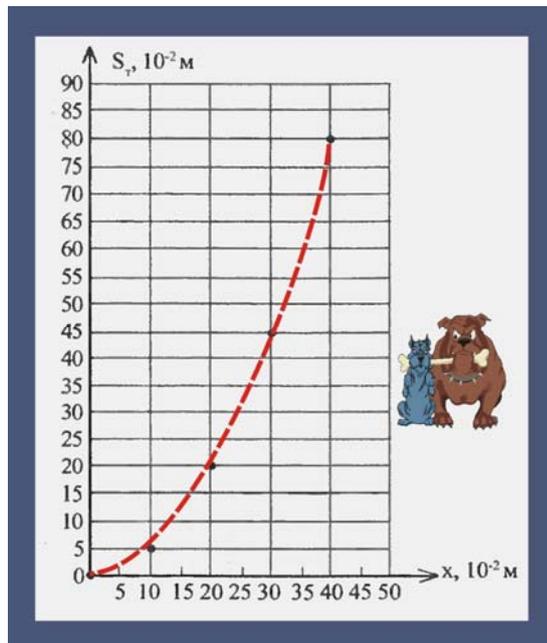


Рис. 341.Б. Результаты измерений

342. Идеальный газ сжимают таким образом, что выполняется соотношение  $pV^2 = \text{const}$ . Как при этом изменяются следующие физические параметры:

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ		ИХ ИЗМЕНЕНИЕ
А) Температура		1) увеличится
Б) Давление		2) уменьшится
В) Внутренняя энергия		3) не изменится

Рис. 342. Изменение физических параметров

### Решение

1. В соответствии со следствием из основного уравнения МКТ давление идеального газа определяется как:

$$p = nk_B T,$$

поскольку газ сжимают, то давление должно увеличиваться, как и абсолютная температура.

2. Изменение внутренней энергии сжимаемого идеального газа:

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

температура увеличивается в этом процессе, поэтому увеличивается и внутренняя энергия молекул газа. Таким образом все три обозначенные параметра увеличиваются.

343. Установить соответствие между именами учёных XIX в. и их вкладом в развитие электродинамики.

Ученые	Вклад ученого в науку
А) Майкл Фарадей	1) Экспериментально обнаружил распространение электромагнитных волн в воздухе
Б) Джеймс Максвелл	2) Ввел представления о существовании электрического и магнитного полей
В) Генрих Герц 	3) Создал теорию распространения электромагнитных волн

Рис. 343. Соответствие научных достижений и авторов

### Решение

А	Б	В
2	3	1

344. Пучок белого света, пройдя через призму, разлагается в спектр. Была выдвинута гипотеза, что ширина спектра, получаемого на стоящем за призмой экране, зависит от угла падения пучка на грань призмы. Необходимо экспериментально подтвердить эту гипотезу. Какие два опыта для этого нужно провести?

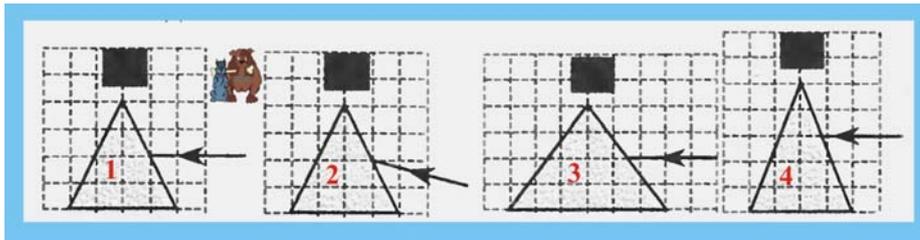


Рис. 344.1. Набор экспериментальных призм

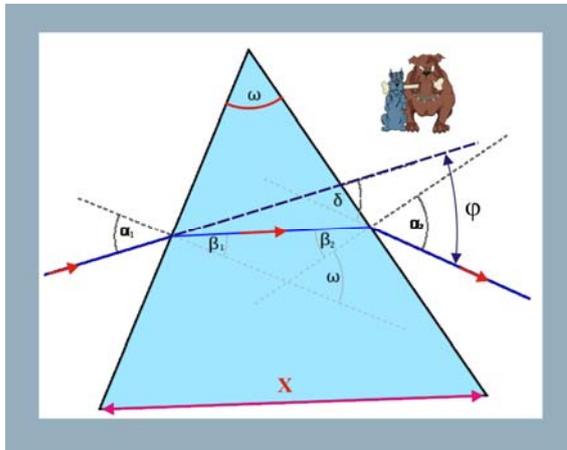


Рис. 344.2. Ход лучей в призме

### Решение

1. Для выявления указанного эффекта необходимо использовать две призмы одинакового размера, изготовленные из одного сорта стекла с одинаковым преломляющим углом  $\omega$ , т.е. призмы 1 и 2.

2. Дисперсия света в призме зависит от параметров самой призмы и длины волны падающего света

$$D = \frac{2 \sin(\omega/2)}{\cos(\omega/2 + \varphi/2)} \frac{dn}{d\lambda}$$

Как видно из дисперсионного уравнения, угол  $\alpha_1$  не влияет на дисперсионные характеристики призмы.

345. Шарик уронили в воду с некоторой высоты. На рис. 345. показан график изменения координаты шарика с течением времени. Согласно графику:

- 1) шарик всё время двигался с постоянным ускорением;
- 2) ускорение шарика увеличивалось в течение всего времени;
- 3) в первые 3 с шарик двигался с постоянной скоростью;
- 4) после 3 с шарик двигался с постоянной скоростью?

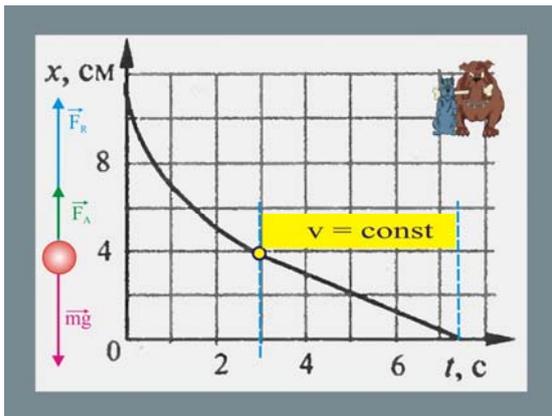


Рис. 345. График движения шарика в воде

### Решение

1. Шарик движется в воде под действием трёх сил: постоянной силы тяжести  $m\vec{g}$ , постоянной силы Архимеда  $\vec{F}_A$  и силы сопротивления  $\vec{F}_R = \zeta v^n$ , которая зависит от скорости.

2. Через 3 с после начала движения сумма сил Архимеда и сопротивления становится равной силе тяжести по модулю, естественно и шарик движется равномерно, а в первые 3 с движение будет ускоренным. В этой связи верным является утверждение №4.

346. Изучаются колебания математического маятника. Результаты измерения каких величин дадут возможность рассчитать период колебаний маятника:

- 1) массы маятника и табличного значения ускорения свободного падения;

- 2) длины маятника и табличного значения ускорения;
- 3) амплитуды колебаний маятника и его массы;
- 4) амплитуды колебаний маятника и табличного значения ускорения свободного падения.

### Решение

1. Малые собственные свободные колебания математического маятника являются изохронными, т.е. их период не зависит от амплитуды

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

эта закономерность была обнаружена Галилео Галилеем (Христиан Гюйгенс тоже претендовал на авторство) и реализована в маятниковых часах.

2. Таким образом, длина математического маятника и табличное значение ускорения свободного падения  $g$  позволяют вычислять период колебаний.

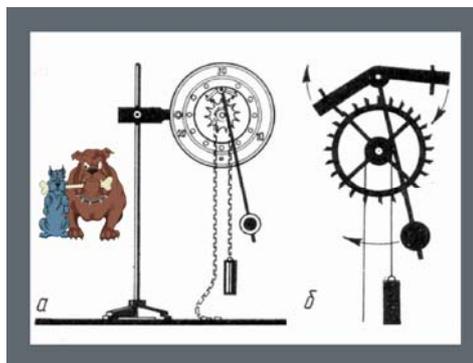


Рис. 346. Колебательные системы

347. Шарик катится по желобу. Изменение координаты шарика с течением времени в инерциальной системе отсчёта показано на графике. На основании данных графика можно утверждать:

- 1) скорость шарика постоянно увеличивалась;
- 2) первые 2 с скорость возрастала, а затем оставалась постоянной;
- 3) первые 2 с шарик двигался с уменьшающейся скоростью, а затем покоился;
- 4) на шарик действовала всё увеличивающаяся сила?

### Решение

1. Последние 2 с координата шарика оставалась постоянной, значит – он покоился.

2. Первые 2 с шарик двигался равнозамедленно в соответствие с уравнениями

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

3. Справедливо утверждение №3.

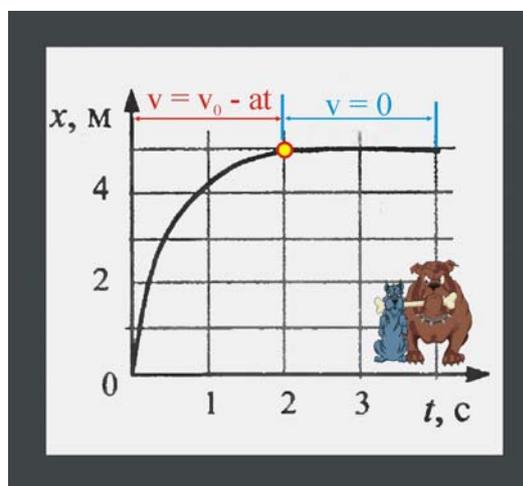


Рис. 347. Движение шарика

348. Приведены результаты измерения давления постоянной массы разреженного газа при повышении температуры. Погрешность измерения температуры  $\Delta T = \pm 10$  К, давления  $\Delta p = \pm 2 \cdot 10^4$  Па. Газ занимает объём  $V = 5$  л. Чему равно число молей газа?

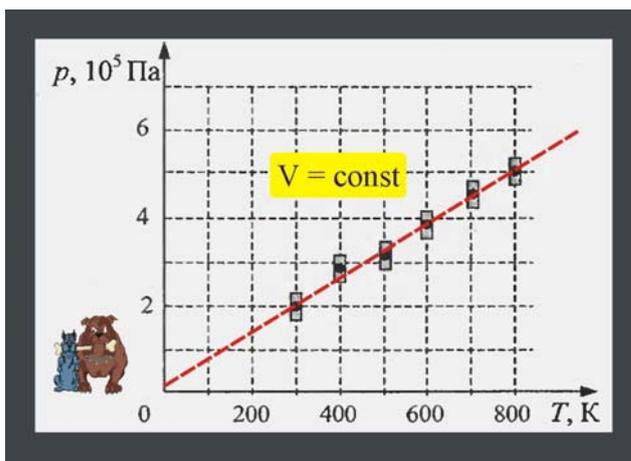


Рис. 348. Изохорный процесс

### Решение

1. Газ разреженный, поэтому к нему можно применять законы идеального газа, для которого характерно, что расстояния между молекулами существенно больше размеров самих молекул, отчего взаимодействие происходит, только при столкновениях

$$pV = \nu RT; \quad \nu = \frac{pV}{RT};$$

2. Зависимость  $p = f(T)$  в пределах указанных погрешностей является линейной, поэтому расчетную точку выбираем исходя из удобства вычислений:  $T = 800 \text{ К}$ ,  $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$

$$\nu \approx \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{8,3 \cdot 800} \approx 0,38 \text{ моль};$$

349. Установить соответствие между техническими устройствами и физическими явлениями, лежащими в основе принципа их действия.

УСТРОЙСТВА	ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
А) двигатель постоянного тока	1) тепловое действие тока
Б) компас	2) взаимодействие проводника с током и постоянного магнита
В) электрометр	3) взаимодействие электрических зарядов
	4) химическое действие тока
	5) взаимодействие постоянных магнитов



Рис. 349. Соответствие устройств и физических явлений

### Решение

А	Б	В
2	5	3

350. Установить соответствие между научными открытиями и именами их авторов.

### Решение

А	Б	В
2	5	3

ФИЗИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ	ИМЕНА УЧЕНЫХ
А) экспериментальное открытие магнитного действия электрического тока	1) А.С. Попов
Б) экспериментальное открытие явления электромагнитной индукции	2) Х.К. Эрстед
В) экспериментальное открытие электромагнитных волн	3) Г. Герц
	4) Дж. Максвелл
	5) М. Фарадей



Рис. 350 Соответствие научных открытий и имён их авторов

351. Необходимо экспериментально установить, зависит ли период колебаний математического маятника от длины нити подвеса. Какую из указанных пар маятников можно использовать для этих целей?

**Решение**

1. Считая маятники математическими, а колебания происходящими с малыми амплитудами, период колебаний можно выразит уравнением

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

2. В принципе, поскольку масса не входит в уравнение периода, то можно использовать два любых маятника с разной длиной подвеса, но чтобы исключить влияние сопротивления со стороны воздуха, для чистоты эксперимента, так сказать, грузы маятников лучше выбрать одного объёма. Можно экспериментировать с маятниками А и В или с маятниками Б и Г.

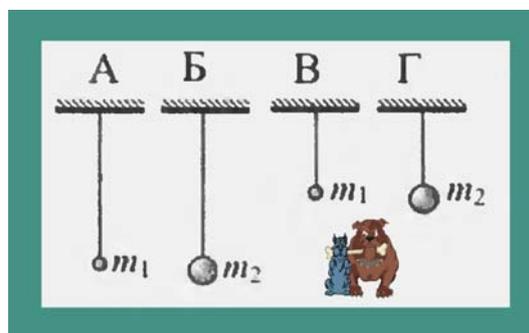


Рис. 351. Варианты маятников

352. Необходимо экспериментально обнаружить зависимость электрического сопротивления круглого угольного стержня от его длины. Какую из приведенных пар стержней можно использовать для этих целей?

**Решение**

1. Электрическое сопротивление однородного линейного проводника определяется уравнением

$$R = \rho \frac{\ell}{S},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление угля,  $\ell$  – длина стержня,  $S$  – площадь поперечного сечения.

2. Для эксперимента надо взять стержни одинакового сечения, но разной длины, т.е. А и В, или Б и Г.

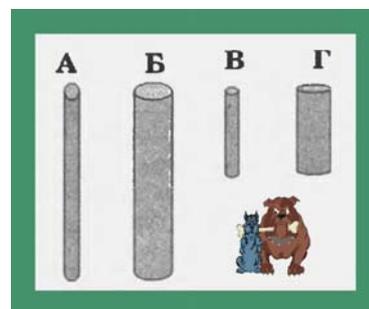


Рис. 352. Варианты стержней

353. Необходимо экспериментально установить, зависит ли период колебаний пружинного маятника от массы груза. Какую из пар маятников можно использовать для этой цели?

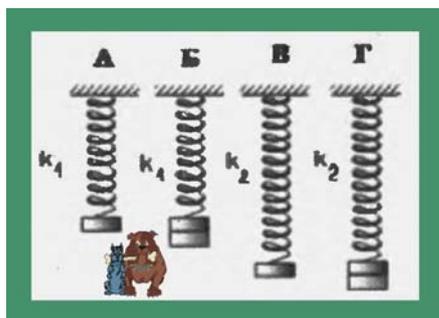


Рис. 353. Варианты маятников

### Решение

1. Период колебаний пружинного маятника определяется уравнением

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

что делает необходимым использовать в эксперименте пружины одинаковой жёсткости, к которым подвешивать различные массы.

2. Для поставленных целей можно использовать маятники А и Б или В и Г.

354. Необходимо экспериментально установить, зависит ли период колебаний пружинного маятника от жёсткости пружины. Какой из маятников, изображённых на рис. 353 можно использовать для этих целей?

### Решение

1. Как видно из уравнения периода колебаний пружинного маятника (предыдущая задача) необходимо использовать маятники с одинаковой массой и пружинами разной жёсткости, т.е. А и В или Б и Г.

355. Необходимо экспериментально обнаружить зависимость электрического сопротивления круглого проводящего стержня от свойств материала, из которого он изготовлен. Какие стержни из приведенных на рис. 355 можно использовать для этих целей?

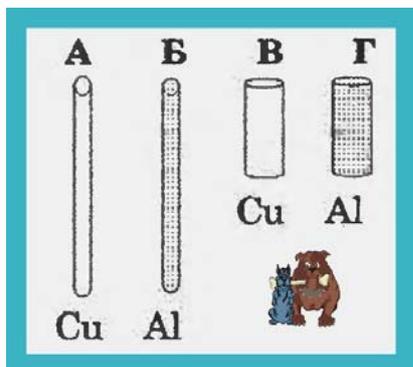


Рис. 355. Варианты стержней

### Решение

1. Электрическое сопротивление однородного линейного проводника определяется уравнением

$$R = \rho \frac{\ell}{S},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление угля,  $\ell$  – длина стержня,  $S$  – площадь поперечного сечения.

2. В предлагаемом эксперименте необходимо установить влияние на электрическое сопротивление удельного сопротивления материала, поэтому стержни должны быть одинаковой длины и равного поперечного сечения, но выполненные из материала с разным  $\rho$ . Этому условию удовлетворяют стержни А и Б или В и Г.

356. Необходимо экспериментально установить, зависит ли выталкивающая сила от объема, погруженного в жидкость тела. Какой набор цилиндров можно использовать для этих целей?

### Решение

1. Выталкивающая сила (сила Архимеда) определяется уравнением

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_T,$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $V_T$  – объём погруженного в жидкость тела.

2. Для экспериментального ответа на поставленный вопрос необходимы стержни разного объёма, но измерять динамометром придётся не саму силу Архимеда, а разность силы тяжести и выталкивающей силы

$$F = mg - \rho_{\text{ж}} g V_T = \rho_{\text{Т}} g V_T - \rho_{\text{ж}} g V_T = g V_T (\rho_{\text{Т}} - \rho_{\text{ж}}),$$

необходимо использовать стержни Б.

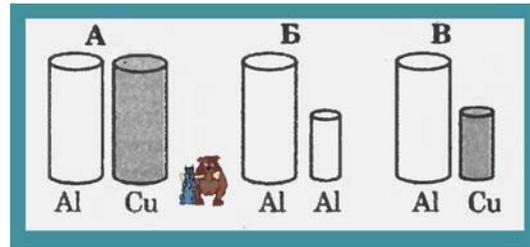


Рис. 356. Набор цилиндров

357. В мензурку налита вода. Записать значение объёма воды, учитывая, что погрешность измерения равна половине цены деления.

### Решение

1. Метод Корнфельда, заключается в выборе доверительного интервала в пределах от минимального до максимального результата измерений, и погрешность как половина разности между максимальным и минимальным результатом измерения:

$$\Delta V = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{2}; \quad \Delta x = \frac{65 - 55}{2} = 5 \text{ мл};$$

2. Значение объёма определится с точностью:

$$V = (60 \pm 5) \text{ мл};$$

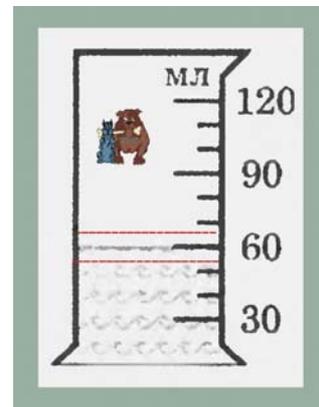


Рис. 357. Измерение объёма воды

358. Длину бруска измеряют с помощью линейки. Записать результат измерения, учитывая, что погрешность измерения равна половине цены деления.

### Решение

1. Доверительный интервал;

$$\Delta l = \frac{l_{\text{max}} - l_{\text{min}}}{2};$$

$$\Delta l = \frac{0,775 - 0,725}{2} = 0,25 \text{ см};$$

$$l = (7,5 \pm 0,25) \text{ см};$$

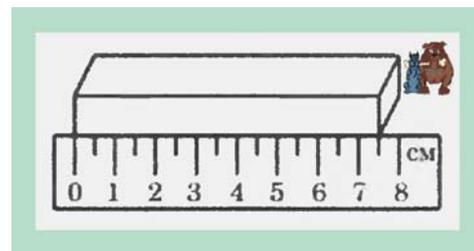


Рис. 358. Измерение длины бруска

359. Исследуется зависимость между силой трения скольжения тела, движущегося равномерно по горизонтальной поверхности, и силой нормального давления. Для этой цели используется динамометр и шесть одинаковых брусков массой 100 г каждый, которые по очереди ставят друг на друга, меняя тем самым силу нормального давления. Полученные во время эксперимента данные оформлены в виде таблицы

$F_{\text{Тр}}, \text{ Н}$	2,5	5	7,5	9	11	13
----------------------------	-----	---	-----	---	----	----

m, г	100	200	300	400	500	600
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Проанализировав полученные данные, высказали следующие предположения:

А) Прямая пропорциональная зависимость между силой трения скольжения и силой нормального давления наблюдается для первых трёх измерений;

Б) Прямая пропорциональная зависимость между силой трения скольжения и силой нормального давления наблюдается для последних трёх измерений?

Какое из предположений является верным?

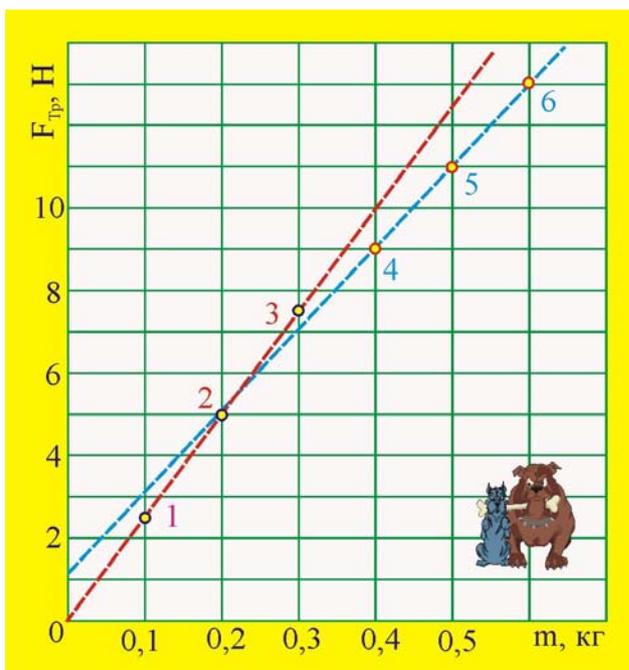


Рис. 359. Экспериментальные точки

### Решение

1. Сила трения скольжения вычисляется по уравнению

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg; \Rightarrow \mu = \frac{F_{\text{тр}}}{mg},$$

если в последнее уравнение подставить приведенные в таблице данные, то коэффициент трения скольжения получается больше единицы, чего быть не может, очевидно, сила трения исчислялась не в ньютонах или в таблице пропущен множитель.

2. Как видно из графического представления результатов, прямая проведенная через последние три точки пересекает ось сил при некотором значении, что указывает на ошибочность результатов.

---

360. Чтобы проверить одновременность падения тел с одинаковой высоты под действием силы тяжести, необходимо бросать тела:

1. Разной массы с одной и той же высоты в воздухе;
2. Разной массы с одинаковой высоты в вакууме;
3. Одинаковой массы с разных высот в вакууме;
4. Одинаковой массы с разных высот в воздухе.

### Решение

1. Нужно делать, как это делал в своё время Галилей, опровергая Аристотеля. Он бросал с Пизанской башни шары, скрепленные цепочкой, равного диаметра, один выточенный из дерева, а второй отлитый из чугуна.

2. Для увеличения точности измерений лучше бросать шары разной массы с одинаковой высоты в вакууме, дабы исключить влияние сил сопротивления со стороны воздуха, в этом случае уравнение

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

может быть принято в качестве расчетного непосредственно.

---

## 16. Тренировочное задание №1

1. Четыре тела движутся вдоль оси  $Ox$ . Приведены зависимости проекций скоростей тел  $v_x$  от времени  $t$ . Какое из этих тел движется с наименьшим по модулю ускорением?

### Решение

1. Поскольку зависимости проекций скорости тел от времени представляют собой линейные зависимости, то модуль ускорения может определяться по уравнению

$$|\vec{a}_x| = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}; \quad \Delta t = 5\text{с};$$

2. Минимальное значение  $\Delta v_x$  имеет тело №3.

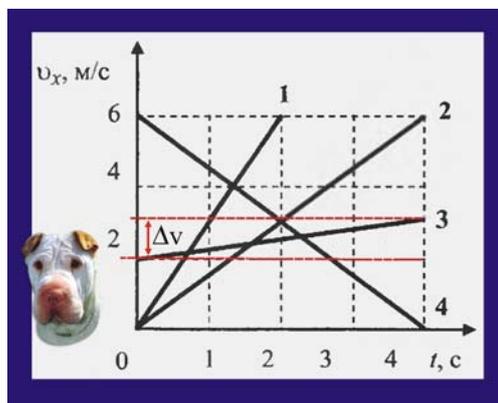


Рис.1. Зависимости скорости от времени

2. Тележку массой  $m = 3$  кг, движущуюся по гладкому горизонтальному столу, толкают силой  $F = 6$  Н в направлении движения. Каково ускорение тележки в направлении движения?

### Решение

1. В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}; \quad \Rightarrow \quad a = \frac{F}{m} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

3. Камень массой 200 г брошен под углом  $\alpha = 45^\circ$  к горизонту с начальной скоростью  $v_0 = 15$  м/с. Чему равен модуль силы тяжести, действующей на камень в момент броска?

### Решение

1. Сила тяжести будет иметь одну и ту же величину, как в начале броска, так и при падении тела на землю

$$P = mg = 0,2 \cdot 10 = 2\text{Н};$$

4. Шары движутся со скоростями показанными на рисунке испытывают неупругий удар и слипаются. Как будет направлен импульс шаров после столкновения?

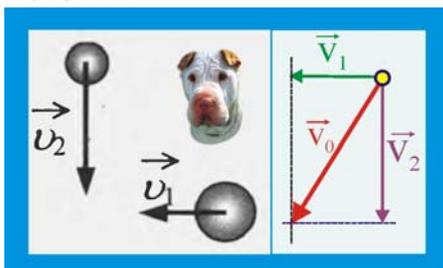


Рис. 4. Неупругий удар шаров

### Решение

1. В соответствии с законом сохранения импульса

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}_0;$$

2. В скалярной форме, с учётом взаимно перпендикулярного движения шаров, векторное уравнение закона сохранения импульса примет вид

$$|(m_1 + m_2)\vec{v}_0| = \sqrt{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2},$$

чтобы узнать направление импульса после слипания, достаточно сложить векторы заданных скоростей по правилу параллелограмма.

---

5. Легковой автомобиль и грузовик движутся по мосту. Их массы  $m_1 = 1000$  кг и  $m_2 = 3000$  кг соответственно. Во сколько раз потенциальная энергия грузовика относительно уровня воды больше потенциальной энергии легковушки?

### Решение

1. Запишем уравнения потенциальной энергии транспортных средств относительно воды, уровень каковой примем на нулевой уровень потенциальной энергии

$$\left. \begin{array}{l} \Pi_2 = m_2 gh; \\ \Pi_1 = m_1 gh; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 3;$$


---

6. Пружинный маятник совершает незатухающие колебания с периодом  $T = 0,5$  с. В момент времени  $t = 0$  отклонение маятника от положения равновесия максимально. Сколько раз кинетическая энергия маятника достигнет своего максимального значения к моменту времени  $\tau = 2$  с?

### Решение

1. В системах, совершающих свободные не затухающие колебания кинетическая и потенциальная энергия изменяются в удвоенной частотой по сравнению со смещением, скоростью и ускорением, поэтому кинетическая энергия будет гармонически меняться во времени с периодом  $T_K = T/2 = 0,25$  с

2. Количество максимальных значений кинетической энергии за время  $\tau$  определится как:

$$\zeta = \frac{\tau}{T_K} = \frac{2}{0,25} = 8;$$


---

7. Под микроскопом наблюдают хаотическое движение мельчайших частиц мела в капле растительного масла. Как называется это явление?

### Решение

1. Наблюдать воочию модель теплового движения молекул посчастливилось не физику, не химику, а ботанику, Роберту Броуну (1773 – 1858), хранителю научной библиотеки Королевской академии. Возвратившись из очередной географической экспедиции, Броун в тиши лондонского кабинета в 1827 г. изучал посредством микроскопа добытые экземпляры растений. Очередь дошла до цветочной пыльцы, представляющей собой, по сути, мелкодисперсные крупинки. Капнув на покровное стеклышко капельку воды, Броун внёс туда некоторое количество цветочной пыльцы. Посмотрев в микроскоп, Броун обнаружил, что в фокальной плоскости микроскопа происходит непонятное (рис. 7).

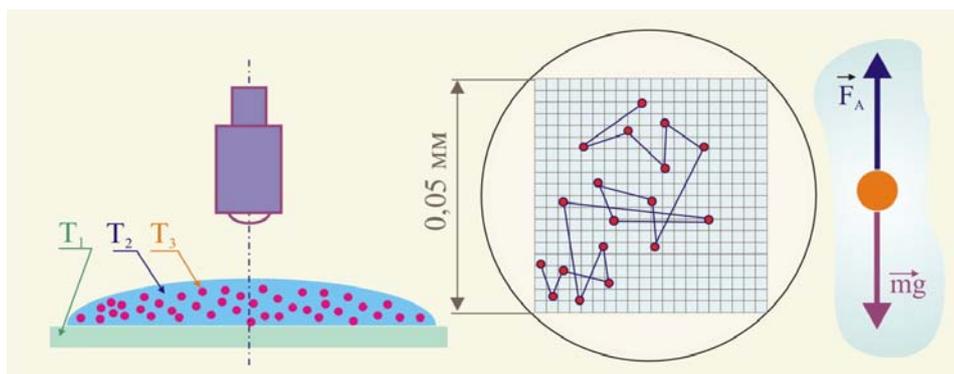


Рис. 7. Наблюдения Роберта Броуна

2. Частицы пыли постоянно перемещались хаотичным образом, не позволяя исследователю их рассмотреть. Первое, что пришло в голову ботанику – конвективные потоки. Разные температуры стекла  $T_1$ , воды в капле  $T_2$  и самих частичек  $T_3$  вполне могли вызвать конвекционные тепловые потоки, которые и увлекали объекты наблюдения. Выждав время, когда температуры должны были сравняться, Броун снова устремил свой пыливый взор в микроскоп. Ничего не изменилось. Пыльца продолжала сновать. Пришла новая идея. На этот раз под подозрение попали английские кэбы, повозки для перевозки грузов и пассажиров, снабжённые деревянными колёсами с железными ободьями. Как предположил Броун, катясь по брусчатке мостовой, колёса экипажей содрогали землю и здания. Было решено эксперимент перенести в загородный дом, где нет кэбов, брусчатки и вообще, там спокойнее, чем в Лондоне. Но и эта уловка не принесла желаемых результатов. Необъяснимая суeta частиц продолжалась.

3. Исчерпав свои возможности усмирить непокорные пылинки, Броун решил поведать о своих наблюдениях коллегам. Опубликованная Броуном статья имела типичное для того неторопливого времени название: «Краткий отчёт о микроскопических наблюдениях, проведенных над частицами в июне и августе 1827 г., содержащимися в пыльце растений; и о существовании активных молекул в органических и неорганических телах».

4. По началу статья Броуна вызвала у специалистов недоумение, отчасти, наверное, ввиду необычности наблюдаемого явления, отчасти вследствие пространственных разглагольствований автора о «живой силе», присущей органическим веществам. Вместе с тем, спустя некоторое время, факт нестандартного поведения частиц заинтересовал физиков. Голландец Корнабель в 1880 г. и француз Гуи в 1888 г. повели более тщательные наблюдения, из которых стало ясно, что степень подвижности частиц определяется их массой и температурой.

5. Первоначально предположили, что наблюдаемые частицы движутся от ударов, получаемых от молекул окружающей их жидкости. При несоизмеримо больших размерах частицы получают одновременно множество ударов со всех сторон, поэтому результирующий импульс должен быть равным или близким к нулю. В этой связи заметного движения крупных частиц не наблюдается.

6. Если рассматривать частицы мелкие, как это случилось в опытах Броуна, то количество единичных импульсов, получаемых частицей с разных направлений, будет уже не одинаковым. Во-первых, число соударений станет несимметричным, во-вторых скорости с которыми будут подлетать молекулы жидкости к частице тоже будут неодинаковыми, поскольку они являются результатом обмена импульсами с соседними молекулами жидкости. Такая возможная

двойная асимметрия сообщает частице некий результирующий импульс, под действием которого она получает некоторое перемещение  $r$ , которое будет продолжаться, пока новый результирующий импульс не изменит направление её перемещения.

7. Исследователи влияние внутренних течений жидкости отбросили сразу, потому что в области течения частички должны перемещаться в одном или близком направлении, на опыте такого не наблюдалось. Соседние частицы двигались совершенно независимо.

8. Ботанику, можно сказать, повезло. Броун совершенно случайно в качестве объектов исследования выбрал частицы, на которые в воде действовали две силы: сила тяжести и сила Архимеда, причём модули этих сил были практически одинаковы. Частицы находились в воде в состоянии безразличного равновесия. **Физики совершенно справедливо предположили, что броуновское движение, так оно было названо в честь человека, впервые его наблюдавшего.** Причиной такого движения являются беспорядочные столкновения частиц, в результате которых они обмениваются своими импульсами и энергиями, хаотически меняя направления своих перемещений.

---

8. Разреженный углекислый газ изобарно сжимается. Масса газа постоянна. Как надо изменить абсолютную температуру газа, чтобы уменьшить его объём в 4 раза?

#### Решение

1. Разреженный углекислый газ можно считать идеальным и примерять к нему уравнение состояния Клапейрона – Менделеева

$$\left. \begin{array}{l} pV = \nu RT_1 \\ p \frac{V}{4} = \nu RT_2 \end{array} \right\} \Rightarrow 4 = \frac{T_1}{T_2};$$

2. Температуру необходимо уменьшить в 4 раза.

---

9. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде  $\varphi = 60\%$ . Какой станет относительная влажность, если объём сосуда при неизменной температуре уменьшить в 1,5 раза?

#### Решение

1. Относительную влажность можно выражать через давление паров или через их плотность

$$\varphi_1 = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{нн}}} = \frac{m}{\rho_{\text{нн}} V}; \quad \varphi_2 = \frac{1,5m}{\rho_{\text{нн}} V}; \quad \varphi_2 = 1,5\varphi_1 = 90\%.$$

---

10. После совершения работы и получения количества теплоты  $Q = 5$  кДж внутренняя энергия газа увеличилась на  $\Delta U = 8$  кДж. Какая была совершена работа?

#### Решение

1. Изменение внутренней энергии в данном процессе превосходит по величине полученное количество тепла, поэтому работа совершается внешними силами. На основании первого начала термодинамики имеем:

$$Q = \Delta U - A; \Rightarrow A = \Delta U - Q = 3 \text{ кДж};$$

---

11. Представлено расположение двух неподвижных точечных электрических зарядов  $+q$  и  $-q$  ( $q > 0$ ). Определить направление суммарного электрического поля этих зарядов в точке А.

**Решение**

1. Напряжённость электрического поля точечных зарядов в заданной точке А:

$$|\vec{E}_+| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_+}{r_1^2};$$

$$|\vec{E}_-| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_-}{r_2^2};$$

2. По условию задачи:

$$r_2 > r_1; \Rightarrow E_+ > E_-;$$

3. На основании принципа суперпозиции электрических полей:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_+ + \vec{E}_-; \quad |\vec{E}_A| = E_+ - E_-;$$

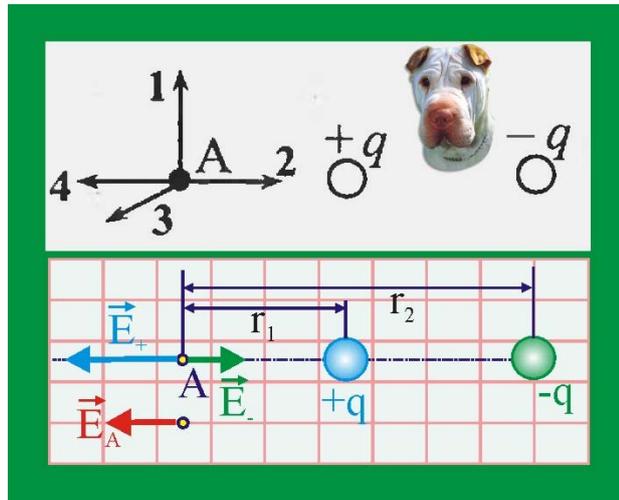


Рис. 11. Принцип суперпозиции

12. Чему равно полное сопротивление участка цепи между клеммами А и В, если сопротивление каждого резистора равно  $R = 3$  Ом?

**Решение**

1. Суммарное сопротивление последовательных резисторов

$$R_{1,2} = R_1 + R_2 = 6 \text{ Ом};$$

2. Сопротивление параллельных резисторов

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3}; \quad R_{AB} = \frac{R_{1,2} \cdot R_3}{R_{1,2} + R_3} = 2 \text{ Ом};$$

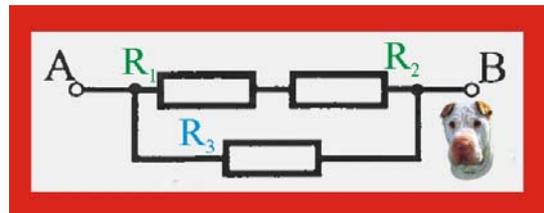


Рис. 12. Сопротивление цепи

13. Магнитное поле  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$  создано в точке А двумя параллельными проводниками с токами  $I_1$  и  $I_2$  расположенными перпендикулярно плоскости чертежа. Определить направление векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ .

**Решение**

1. Линии магнитного поля прямолинейного проводника образуют концентрические окружности. При расположении двух и трёх витков рядом, поля каждого из витков накладываются друг на друга, при этом можно считать, что каждый виток как будто присоединён к самостоятельному источнику ток.

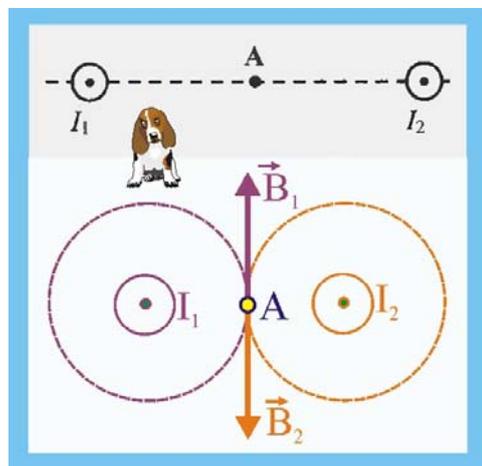


Рис.13.1. Направление индукции

2. В ходе экспериментов было обнаружено, что неподвижный электрический заряд не взаимодействует с магнитным полем. Между ними не проявляются силы притяжения и отталкивания, однако, если заряд или магнит привести в движение, то между ними тот час же появится сила взаимодействия, стремящаяся вращать их друг относительно друга.

3. Сила взаимодействия зависит от относительной скорости перемещения и взаимного направления движения. Вокруг движущихся зарядов возникают замкнутые силовые линии, по отношению к которым векторы возникающих магнитных сил будут направлены по касательной. Концентрические силовые линии будут охватывать всю траекторию движущихся зарядов.

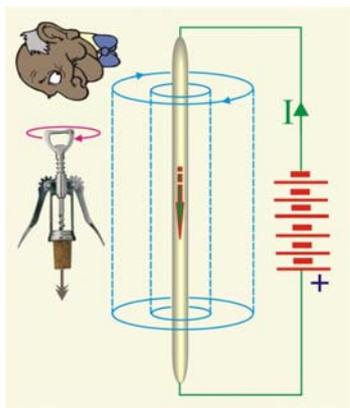


Рис. 183.2. Направление поля

4. Картина силовых линий показывает, что линии действия магнитных сил лежат в плоскости перпендикулярной направлению течения тока. Направление магнитного поля принято определять по правилу буравчика (рис. 183.2).

5. Если поступательное направление винта (буравчика, штопора) совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения головки винта или штопора будет соответствовать направлению линий магнитного поля. Можно воспользоваться и другим правилом. Если смотреть по направлению тока, то магнитные линии будут направлены в сторону движения часовой

стрелки.

6. Следует особо отметить отличие движений исследуемых в рамках электродинамики от механических перемещений. Механическое движение характеризует изменение взаимного положения тел относительно друг друга или относительно выбранной системы отсчёта. Электрический ток сопряжён с перемещением носителей заряда, однако явление возникновения тока не может быть сведено к одним только перемещениям носителей.

7. Дело в том, что заряженные частицы перемещаются вместе с собственным электрическим полем, а движение электрического поля, в свою очередь инициирует возникновения поля магнитного. В этой связи по своей сущности электрический ток сопряжён с магнитным полем. Напряжённость этого поля в любой точке пространства пропорциональна силе тока. Устоялось мнение, что магнитное поле не может быть получено отдельно и независимо от электрического тока. Магнитные поля намагниченных тел, например, природные магниты, тоже имеет таковые свойства вследствие особенностей их внутриатомных токов. Возникновение магнитных полей не связано с физическими характеристиками проводника, а определяется исключительно силой текущего по ним тока.

8. С позиций магнетизма, термин «сила тока» не совсем адекватен обстоятельствам. Величина тока (это более конкретное определение) на самом деле можно рассматривать как быстроту переноса количества заряда, так и математически определён ток. С другой стороны величина тока однозначно определяет магнитное поле тока, т.е. синтезирует в себе сложную картину действительных перемещений заряженных частиц.

14. Как изменится период собственных электромагнитных колебаний в контуре, если ключ перевести из положения 1 в положение 2?

**Решение**

1. Запишем уравнение Томсона для двух положений ключа

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi\sqrt{LC}; \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{4LC}; \end{aligned} \right\}$$

2. Разделим уравнения друг на друга:

$$\frac{T_2}{T_1} = 2; \quad T_2 = 2T_1;$$

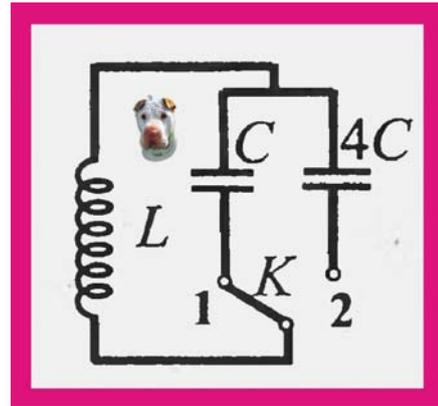


Рис. 14. Колебательный контур

15. Какому из предметов 1 – 4 соответствует изображение АВ в тонкой линзе с фокусным расстоянием F?

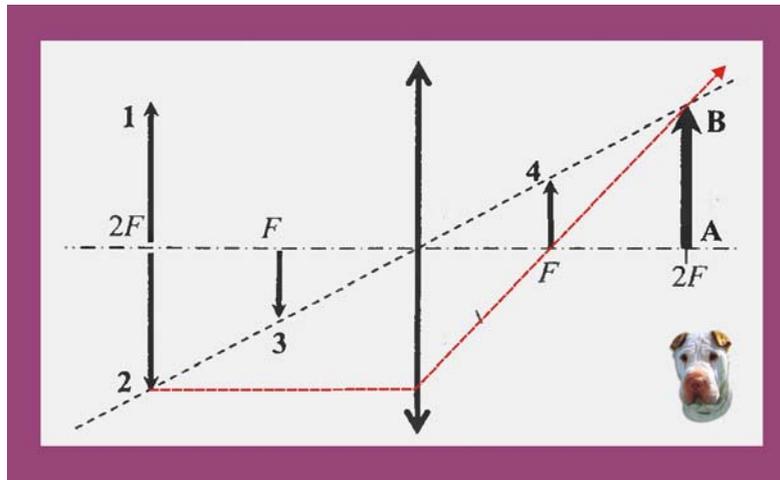


Рис. 15. Изображение в тонкой линзе

**Решение**

1. Луч, падающий нормально к плоскости тонкой собирающей линзы проходит через её фокус с противоположной стороны, значит изображению АВ соответствует предмет 2, все остальные предметы будут давать другие изображения.

16. Как называется оптическое явление, наблюдаемое в пространстве и фиксированное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний?

**Решение**

1. Явление называется интерференцией, на рис. 16 приведен пример интерференции «кольца Ньютона», получаемой при размещении линзы на тонкой пластинке.

17. Как нужно изменить частоту световой



Рис. 16. Интерференция волн

волны, чтобы энергия фотона в световом пучке увеличилась в 1,5 раза?

### Решение

1. Энергия фотона в соответствии с квантовыми представлениями

$$\varepsilon_f = h\nu,$$

чтобы увеличить энергию фотона в 1,5 раза нужно во столько же раз увеличит частоту световой волны.

18. В образце имеется  $N_0 = 2 \cdot 10^{10}$  ядер радиоактивного изотопа  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , имеющего период полураспада  $T_{1/2} = 26$  лет. Через сколько лет останутся не распавшимися  $N = 0,25 \cdot 10^{10}$  ядер данного изотопа?

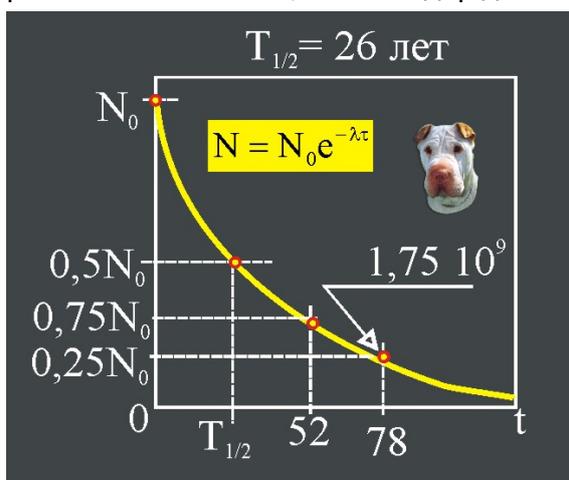


Рис. 18. Закон радиоактивного распада

### Решение

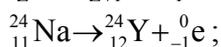
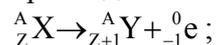
1. Периодом полураспада называется промежуток времени за который распадается половина начального количества радиоактивных ядер.

2. В соответствии с законом радиоактивного распада, за 26 лет распадётся  $1 \cdot 10^{10}$  ядер, за два полупериода, т.е. за 52 года распадётся  $1,5 \cdot 10^{10}$  ядер, а за 78 лет  $1,75 \cdot 10^{10}$ . Через 78 лет останется не распавшимися  $0,25 \cdot 10^{10}$  ядер.

19. В ядро какого элемента превращается ядро радиоактивного изотопа натрия  $^{24}_{11}\text{Na}$  в результате  $\beta^-$  распада?

### Решение

1. Правило смещения при  $\beta^-$  - распаде



2. Элементом Y по таблице Д.И. Менделеева таким элементом является магний  $^{24}_{12}\text{Mg}$ .

20. Идеальный газ в количестве  $\nu$  молей при температуре T и давлении p занимает объём V. Какую константу можно определить по этим данным:

- 1) постоянную Людвиг Больцмана  $k_B$ ;
- 2) постоянную Макса Планка  $h$ ;
- 3) универсальную газовую постоянную R;
- 4) число Авогадро  $N_A$ ?

### Решение

1. По приведенным данным можно определить значение универсальной газовой постоянной, воспользовавшись уравнением Клапейрона – Менделеева

$$pV = \nu RT; \Rightarrow R = \frac{pV}{\nu T};$$

21. Шарик катится по прямолинейному жёлобу. На рис. 21 показано изменение координаты шарика в инерциальной системе координат. На основании графика можно утверждать:

- 1) первые 2 с шарик покоился, а затем двигался с увеличивающейся по модулю скоростью;
- 2) на шарик действовала всё увеличивающаяся сила;
- 3) первые 2 с скорость шарика не менялась, а затем её модуль постепенно уменьшался;
- 4) скорость шарика постоянно уменьшалась?

### Решение

1. В течение первых 2 с шарик покоился, т.к. его координата в течение этого времени не менялась, а затем он начал двигаться ускоренно

$$x(t) = x_0 - \frac{at^2}{2}; \quad v(t) = at;$$

2. Верным является утверждение №1: первые 2 с шарик покоился, а потом двигался с увеличивающейся по модулю скоростью, хотя график нарисован примерно.

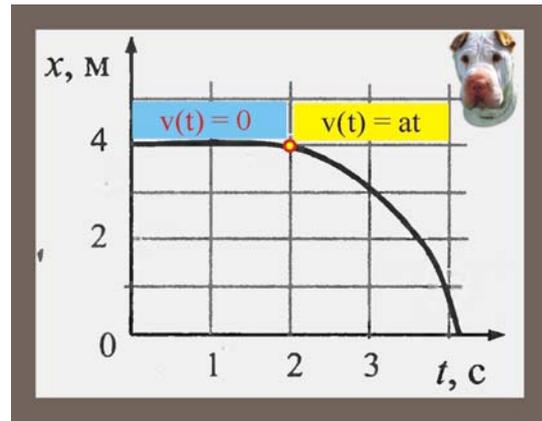


Рис. 21. Движение шарика

22. Груз массой  $m = 2$  кг, подвешенный на тонкой нити, целиком погружен в воду и не касается дна сосуда. Модуль натяжения нити  $T = 13$  Н. Определить объём груза.

### Решение

1. Груз на нити, погруженный в воду полностью находится под действием системы из трёх сил  $\{m\vec{g}, \vec{T}, \vec{F}_A\}$ , силы тяжести, силы натяжения нити и силы Архимеда. Условие равновесия тела:

$$mg = F_A + T; \quad mg - T = \rho_{ж}gV;$$

$$V = \frac{mg - T}{\rho_{ж}g} = \frac{20 - 13}{10^4} = 0,7 \text{ л.}$$

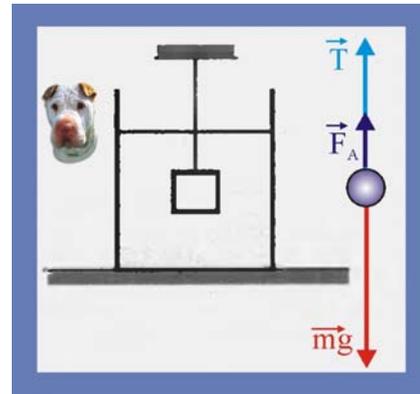


Рис. А22. Объём груза

23. У теплового двигателя, работающего по циклу Карно, температура нагревателя 500 К, температура холодильника 300 К. Рабочее тело за один цикл получает от нагревателя 40 кДж теплоты. Какую работу совершает двигатель в этом цикле?

### Решение

1. Определим КПД двигателя

$$\eta = 1 - \frac{T_X}{T_H} = 0,4.$$

2. Работа, совершаемая за цикл

$$A = \eta Q = 16 \text{ кДж.}$$

24. Две частицы, имеющие отношение масс  $m_2/m_1 = 8$ , влетают в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найти отношение зарядов частиц  $q_2/q_1$ , если их скорости одинаковы, а отношение радиусов их траекторий  $R_2/R_1 = 2$ .

### Решение

1. Запишем для частиц условия их движения в магнитном поле по стационарным круговым орбитам:

$$\left. \begin{aligned} q_2 v B &= \frac{m_2 v^2}{R_2}; \\ q_1 v B &= \frac{m_1 v^2}{R_1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{q_2}{q_1} = \frac{m_2}{m_1} \frac{R_1}{R_2}; \quad \frac{q_2}{q_1} = 4.$$

25. На металлическую пластину падает электромагнитное излучение, выбивающее электроны из пластинки. Максимальная кинетическая энергия электронов, вылетевших из пластинки в результате фотоэффекта, составляет  $K = 6$  эВ, а энергия падающих фотонов в 3 раза больше работы выхода из металла. Определить величину работы выхода.

### Решение

1. Запишем уравнение фотоэффекта согласно заданным условиям

$$h\nu = \frac{m_e v^2}{2} + A; \quad 3A = K_{\max} + A; \quad \Rightarrow \quad A = \frac{K_{\max}}{2} = 3 \text{ эВ}.$$

В1. В ходе адиабатического процесса энергия одного моля разреженного гелия увеличивается. Как при этом изменяются: температура газа, его давление и объём

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется?

### Решение

1. Адиабатический процесс происходит без теплообмена  $\delta Q = 0$ .
2. Изменение внутренней энергии идеального газа, каковым является разреженный гелий

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

увеличение внутренней энергии происходит при увеличении температуры.

3. Изменение давления идеального газа

$$\Delta p = nk_B \Delta T,$$

с возрастанием температуры давление газа тоже увеличивается.

4. Изменение объёма определим по уравнению адиабатического процесса

$$pV^\gamma = \text{const}; \quad \Rightarrow \quad V = \sqrt[\gamma]{\frac{\text{const}}{p}},$$

где  $\gamma = C_p/C_v = (i + 2)/i \cong 1,67$  – показатель адиабаты для молекул с тремя поступательными степенями свободы. С увеличением давления объём должен при адиабатическом процессе уменьшаться.

Температура гелия	Давление гелия	Объём гелия
1	1	2

В2. Монохроматический свет с энергией фотонов  $\varepsilon_f$  падает на поверхность металла, вызывая фотоэффект. При этом напряжение  $U_3$  при котором фототок прекращается. Как изменится длина волны  $\lambda$  падающего света, модуль запирающего напряжения и длина волны «красной границы» фотоэффекта, если энергия падающих фотонов  $\varepsilon_f$  увеличится?

### Решение

1. Длина волны падающего света

$$\varepsilon_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

при увеличении энергии фотонов длина волны **уменьшится**.

2. Модуль запирающего напряжения

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

увеличение энергии фотонов повлечёт за собой **увеличение** запирающего напряжения, потому что кинетическая энергия вылетающих электронов будет выше, а работа выхода постоянна, т.к. является свойством материала фотокатода.

3. «Красная граница фотоэффекта» определяется свойствами фотокатода и от энергии падающих фотонов не зависит, поэтому и **не изменится**.

Длина волны падающего света $\lambda$	Модуль запирающего Напряжения $U_3$	«Красная граница» $\lambda_{кр}$
2	1	3

В3. Пучок света переходит из воды в воздух. Частота световой волны  $\nu$ , длина световой волны в воде –  $\lambda$ , показатель преломления воды относительно воздуха  $n$ . Установить соответствие между физическими величинами и формулами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ	ФОРМУЛЫ
А) скорость света в воздухе	1) $\lambda \cdot \nu$
Б) скорость света в воде	2) $\frac{\lambda}{\nu}$
	3) $\lambda \cdot \nu \cdot n$
	4) $\frac{\lambda}{\nu} \cdot n$

Рис. В3. Соответствие физических величин и уравнений

### Решение

1. Скорость распространения электромагнитной волны её длина и частота связаны уравнением

$$v_{\text{Воды}} = \lambda \nu,$$

частота при переходе из одной среды в другую меняться не будет, а по условию задачи задана длина волны именно в воде, поэтому, записанная выше формула определяет скорость волны в воде.

2. При переходе волны из оптически более плотной среды (из воды) в оптически менее плотную среду (воздух) скорость увеличится пропорционально относительному показателю преломления  $n \approx 1,33$

$$v_{\text{Воз}} = \lambda n v.$$

А	Б
3	1

В4. На неподвижном проводящем кубике находится заряд  $Q$ . Точка  $O$  – центр кубика, точки  $B$  и  $C$  – центры его граней,  $AB = OB$ ,  $CD = OC$ ,  $OM = OB/2$ . Модуль напряжённости электростатического поля заряда  $Q$  в точке  $A$  равен  $E_A$ . Чему равен модуль напряжённости поля в точке  $D$  и в точке  $M$ ?

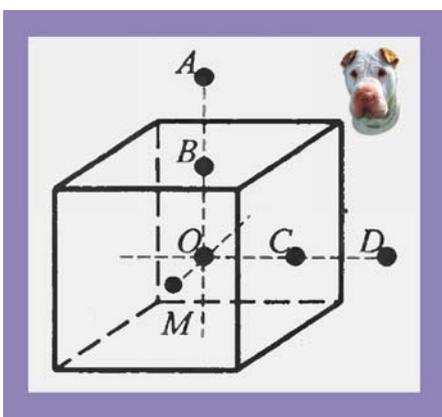


Рис. В4. Напряжённость поля

### Решение

1. Точки  $A$  и  $D$  расположены на одинаковом расстоянии  $r$  от поверхности заряженного кубика, поэтому напряжённости электростатического поля

$$|\vec{E}_A| = |\vec{E}_D| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2};$$

2. Поверхность проводника представляет собой эквипотенциаль, потому что, все заряды всегда сосредоточены на поверхности проводника, поле внутри проводника отсутствует, в противном случае имело бы место движение зарядов, чего не наблюдается в принципе

$$\vec{E}_M = 0;$$

## 17. Тренировочное задание №2

1. Тело начинает падать из состояния покоя и перед ударом о землю имеет скорость  $v = 40$  м/с. Определить время падения тела без учёта сопротивления со стороны воздуха.

**Решение**

1. Уравнения свободного падения тела

$$\left. \begin{array}{l} h = \frac{gt^2}{2}; \\ v = gt; \end{array} \right\} \Rightarrow t = \frac{v}{g} = 4\text{с.}$$

---

2. В инерциальной системе отсчёта сила  $\vec{F}$  сообщает телу массой  $m$  ускорение  $\vec{a}$ . Если на тело массой  $2m$  будет действовать вдвое меньшая сила, то чему будет равно ускорение тела?

**Решение**

1. Запишем второй закон Ньютона для двух заданных случаев

$$\left. \begin{array}{l} \vec{F} = m\vec{a}_1; \\ \frac{\vec{F}}{2} = 2m\vec{a}_2; \end{array} \right\} \Rightarrow 2 = \frac{\vec{a}_1}{2\vec{a}_2}; \quad \vec{a}_1 = 4\vec{a}_2; \quad \vec{a}_2 = \frac{\vec{a}_1}{4}$$

---

3. Два одинаковых шарика с одинаковой массой  $m$  находятся на расстоянии  $r$  друг от друга и притягиваются с силой  $F$ . Какова сила гравитационного притяжения двух других шариков, если масса каждого шарика станет  $2m$ , а расстояние между ними  $2r$ ?

**Решение**

1. Запишем для заданных условий закон гравитационного взаимодействия Ньютона

$$\left. \begin{array}{l} F_1 = G \frac{m^2}{r^2}; \\ F_2 = G \frac{4m^2}{4r^2}; \end{array} \right\} \Rightarrow F_1 = F_2;$$

---

4. Грузовик и легковой автомобиль движутся со скоростями  $v_1 = 54$  км/ч и  $v_2 = 108$  км/ч. Каково отношение массы грузовика к массе легкового автомобиля, если отношение импульса грузовика к импульсу легкового автомобиля равно 1,5?

**Решение**

1. Отношение масс установим, сравнивая импульсы транспортных средств

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = m_1 v_1; \\ p_2 = m_2 v_2; \end{array} \right\} \Rightarrow 1,5 = \frac{m_1}{2m_2}; \quad \frac{m_1}{m_2} = 3.$$

---

5. Для разрушения преграды часто используется массивный шар, раскачиваемый на стреле подъемного крана. Какое преобразование энергии происходит при перемещении шара из положения А в положение Б?

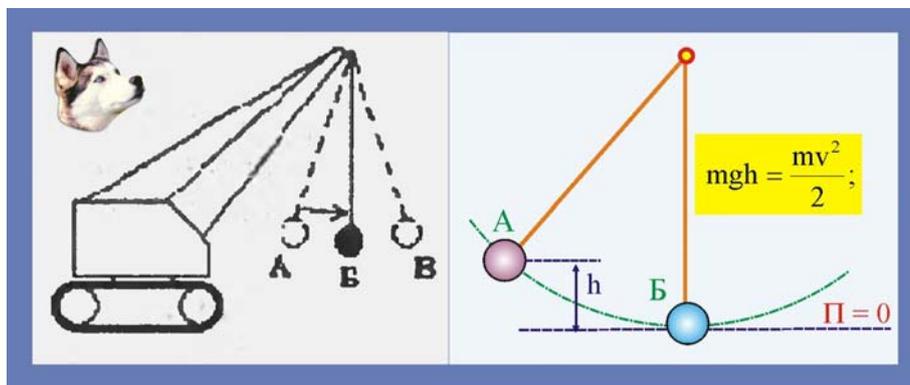


Рис. 5. Преобразование энергии

### Решение

1. Если положение центра масс шара Б принять за нулевой уровень потенциальной энергии  $\Pi = 0$ , то при переводе шара в положение А его центр масс поднимется на высоту  $h$ , шар приобретёт потенциальную энергию  $\Pi = mgh$ , которая в точке Б преобразуется в кинетическую.

6. Задан профиль бегущей волны в некоторый момент времени. Чему равна разность фаз колебаний точек 1 и 3?

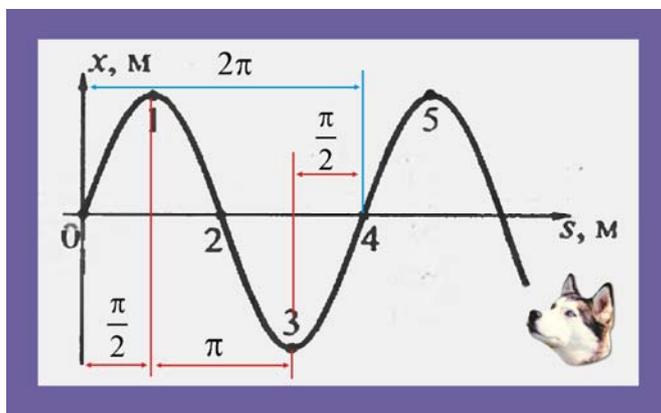


Рис. 6. Профиль волны

### Решение

1. Уравнение плоской бегущей волны

$$x(s, t) = A \sin(\omega t - ks),$$

$$x(s, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}s\right),$$

где  $T$  – период колебаний,  $\lambda$  – длина волны,  $A$  – амплитуда,  $k$  – волновое число, из которого видно что период колебаний эквивалентен  $2\pi$ ,

поэтому разность фаз между точками 1 и 3 –  $\Delta\varphi_{1-3} = \pi$ .

7. Чем объясняется явление диффузии в жидкостях?

### Решение

1. Предположим, что в некотором объёме жидкости имеется вертикальный градиент концентрации молекул. Будем рассматривать концентрацию, как функцию вертикальной координаты  $n(z)$ . Если перпендикулярно оси  $z$  расположить площадку площадью  $s$ , то через неё будет наблюдаться поток частиц, обусловленный выравниванием концентрации в наблюдаемом объёме. Это

происходит вследствие наличия у некоторых молекул жидкости, наряду с колебательными движениями, **хаотических тепловых поступательных движений**.

2. Экспериментально установлено, что в единицу времени через площадку проходит количество частиц

$$\Phi = -D \frac{\partial n}{\partial z} s,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, величина которого определяется физическими свойствами рассматриваемой системы. Поток частиц в единицу времени имеет размерность  $[\Phi] = \text{с}^{-1}$ , поэтому коэффициент диффузии измеряется в

$$[D] = \frac{\Phi}{\frac{\partial n}{\partial z} s} = \frac{\text{с}^{-1} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

3. Знак минус в уравнении означает, что поток частиц направлен от больших концентрацией частиц в сторону меньших концентраций. Умножим далее уравнение потока на массу частиц, принимающих участие в процессе диффузии, получим

$$\Phi m = -D \frac{\partial n}{\partial z} m s, \Rightarrow M = -D \frac{\partial \rho}{\partial z} s,$$

т.к. плотность вещества  $\rho = mn$ . Уравнение  $M$  выражает собой первый закон Фика, который предполагает определение коэффициента диффузии  $D$  для каждого вещества экспериментальным путём.

4. Другими словами, первый закон Фика является эмпирическим законом, применимым не только для газообразных систем. В этой связи следует оговориться, что в жидкостях и твёрдых телах потоки частиц в каких-либо направлениях могут быть вызваны не только молекулярными причинами. Например, конвекционное движение частиц, вызванное внешними причинами, ничего общего с молекулярной диффузией не имеет.

---

8. При охлаждении одноатомного идеального газа средняя кинетическая энергия теплового движения молекул уменьшилась в 2 раза. Как при этом изменилась абсолютная температура газа?

### Решение

1. Людвиг Больцман на основании сравнения термодинамических и механических выражений кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа получил уравнение

$$\frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} k_B T,$$

при уменьшении средней кинетической в два раза, температура тоже уменьшится в два раза.

---

9. Изначально цилиндр, закрытый лёгким подвижным поршнем был заполнен жидким эфиром. Цилиндр начали нагревать, начиная от комнатной температуры. Эфир нагрелся, затем закипел и превратился в пар, когда пар немного нагрелся, нагреватель отключили, и эфир начал остывать. Какой участок графика соответствует конденсации эфира?

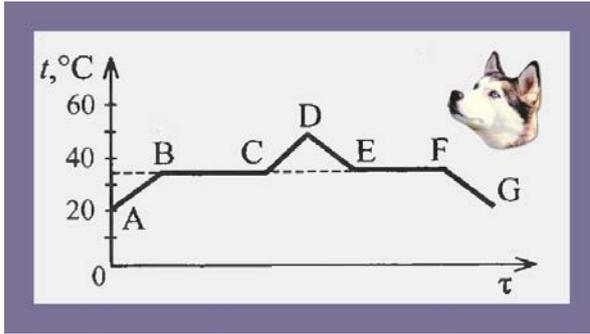


Рис. 9. Зависимость температуры от времени

### Решение

1. Процесс нагревания и охлаждения эфира сопровождается несколькими фазовыми превращениями первого рода, в течение которых температура не изменяется, а всё подводимое тепло расходуется на фазовые превращения: AB – нагревание, BC – переход из жидкого в парообразное состояние, CD – нагревание пара ( в точке D выключение нагревателя), EF – конденсация пара (превращение в жидкость), FG – охлаждение эфира в жидком состоянии до комнатной температуры.

---

10. Внутренняя энергия идеального газа в герметично закрытом сосуде уменьшается при:

- 1) уменьшении потенциальной энергии сосуда;
- 2) изохорном охлаждении;
- 3) уменьшении кинетической энергии сосуда;
- 4) изотермическом сжатии?

### Решение

1. Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа определяется уравнением:

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

для уменьшения внутренней энергии надо понижать температуру, т.е. изохорно (при постоянном объёме) охлаждать.

---

11. Силы взаимодействия между точечными заряженными телами равны по модулю F. Как изменится модуль сил взаимодействия между этими телами, если заряд каждого тела уменьшить в два раза?

### Решение

1. Запишем закон Кулона для заданных электростатических взаимодействий

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2};$$

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{4r^2};$$

$$\Rightarrow F_2 = \frac{F_1}{4};$$

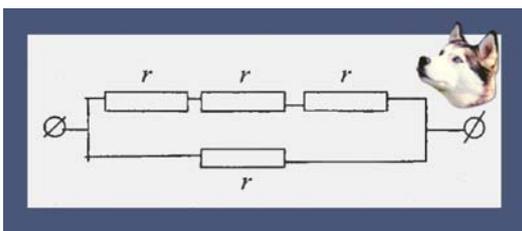


Рис. 12. Сопротивление цепи

12. Каково сопротивление изображенного участка цепи, если сопротивление каждого резистора r?

### Решение

1. Общее сопротивление последо-

вательных резисторов

$$R_1 = 3r;$$

2. Общее сопротивление цепи

$$R = \frac{3r \cdot r}{3r + r} = \frac{3}{4}r;$$

13. Известны направления векторов скорости  $\vec{v}$  э электрона и силы Лоренца  $\vec{F}_L$ , действующей на него в магнитном поле, определить направление вектора магнитной индукции.

**Решение**

1. Направление силы Лоренца

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

для положительных зарядов определяется по правилу левой руки, для отрицательных зарядов, каковым является электрон, направление силы Лоренца будет обратным.

Можно использовать для определения направления правую руку: вытянутые пальцы открытой ладони правой руки совместить с направлением скорости, отставленный в сторону большой палец совместить с направлением силы Лоренца, при этом в открытую ладонь должны входить в открытую ладонь.

2. В данном случае вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости рисунка и направлен от наблюдателя.

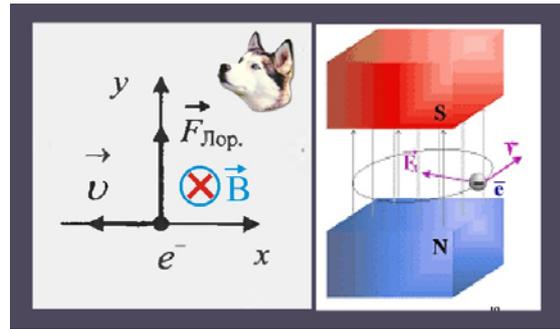


Рис. 13. Направление магнитной индукции

14. Как изменится период собственных электромагнитных колебаний в контуре если переключатель К перевести из положения 1 в положение 2?

**Решение**

1. На основании формулы Томсона:

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= 2\pi\sqrt{9LC}; \\ T_1 &= 2\pi\sqrt{LC}; \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{9} = 3; \quad T_2 = 3T_1;$$

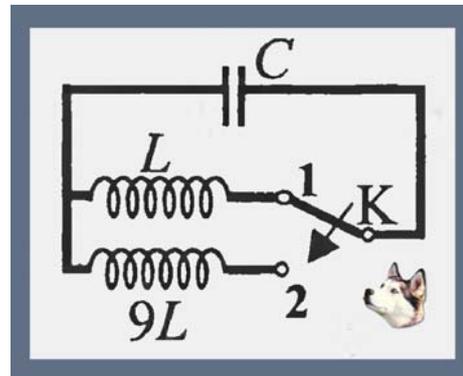


Рис. 14. Колебательный контур

15. Что такое абсолютный показатель преломления среды?

**Решение**

1. Абсолютный показатель преломления  $n$  показывает, насколько фазовая скорость световой волны в вакууме или в воздухе больше чем в данной среде

$$n = \sqrt{\mu\epsilon} = \frac{c}{v},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $c$  – скорость волны в вакууме,  $v$  – скорость той же волны в среде.

---

16. Какое из приведённых ниже утверждений справедливо с точки зрения специальной теории относительности.

Вид законов, которыми описываются физические явления, одинаков:

- А) во всех инерциальных системах отсчёта;
- Б) в любых системах отсчёта?

**Решение**

1. Так называемая, теория относительности была, по сути, создана трудами действительно великих учёных Хенриком Лоренцем и Анри Пуанкаре. Лоренц разработал свои знаменитые преобразования для совмещения электродинамических уравнений Максвелла, Герца, Хевисайда с принципами относительности Галилея – Ньютона, которые справедливы только в инерциальных системах отсчёта, т.е. системах, которые либо покоятся, либо движутся равномерно и прямолинейно. Другими словами, вся математика Лоренца и философия Пуанкаре справедливы только в инерциальных системах.

---

17. Один лазер излучает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda_1 = 700$  нм, другой – с длиной волны  $\lambda_2 = 350$  нм. Определить отношение импульсов фотонов  $p_1/p_2$ , испускаемых лазерами.

**Решение**

1. Импульс фотона определяется как:

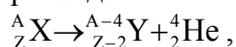
$$p_f = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}; \quad \Rightarrow \quad \left. \begin{array}{l} p_1 = \frac{h}{\lambda_1}; \\ p_2 = \frac{h}{\lambda_2} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{2};$$

---

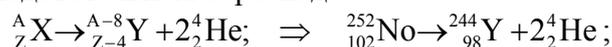
18. Ядро элемента образуется после двух последовательных  $\alpha$ -распадов из материнского ядра изотопа нобелия  ${}_{102}^{252}\text{No}$ . Что это за элемент?

**Решение**

1. Правило смещения при  $\alpha$ -распаде



при двойном последовательном  $\alpha$ -распаде



2. Элементом Y является калифорний  ${}_{102}^{252}\text{Cf}$ .

---

19. Какая из строчек таблицы правильно отражает структуру ядра изотопа фтора  ${}^{17}_9\text{F}$ ?

	$p$ – число протонов	$n$ – число нейтронов
1	9	8
2	9	17
3	17	9
4	17	26

Рис. 19. Протоны и нейтроны

### Решение

1. Количество нейтронов в ядре изотопа фтора

$$N = A - Z = 17 - 9 = 8,$$

первая строчка таблицы правильно отражает состав ядра изотопа фтора.

20. Математический маятник совершает свободные малые гармонические колебания. Какую величину можно определить, если известна длина подвеса маятника  $\ell$  и период его колебаний  $T$ ?

### Решение

1. Уравнение периода малых колебаний математического маятника позволяет определить величину ускорения свободного падения

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}; \Rightarrow \frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{\ell}{g}; \quad g = \frac{4\pi^2\ell}{T^2};$$

21. С использованием нагревателя известной мощности исследовалась зависимость температуры  $m = 1$  кг вещества от количества теплоты, полученной от источника. Результаты оформлены в виде экспериментальных точек. Оценить примерно удельную теплоёмкость вещества.

### Решение

1. Удельная теплоёмкость вещества определяется уравнением

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta t};$$

2. Зависимость  $t = f(Q)$ , будем считать линейной, расчётную точку выбираем из удобства вычислений

$$c = \frac{36}{1 \cdot 8} \approx 4,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}};$$

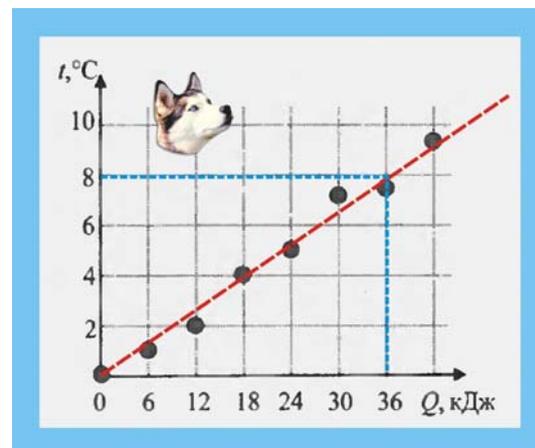


Рис. 21. Зависимость температуры тела от количества полученного тепла

22. Подвешенный на нити грузик совершает гармонические колебания. Приведены координаты грузика через одинаковые промежутки времени. Какова примерно величина максимальной скорости грузика?

$t$ (с)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$x$ (см)	4	2	0	2	4	2	0	2

Рис. 22. Зависимость координаты грузика маятника от времени

### Решение

1. Период колебаний маятника, судя по таблице, равен  $T = 0,8$  с, амплитуда колебаний  $A = 4 \cdot 10^{-2}$  м.

2. Уравнение гармонических колебаний позволяет найти величину максимальной скорости грузика

$$x(t) = A \sin \omega t; \quad v_x(t) = \frac{dx}{dt} = A \omega \cos \omega t;$$

3. Амплитудное значение скорости будет иметь место при  $\cos \omega t = 1$

$$v_{\max} = A \omega = A \frac{2\pi}{T} \cong \frac{6,28}{0,8} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cong 0,314 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

23. Железному и алюминиевому цилиндрам сообщили одинаковое количество теплоты, что привело к одинаковым изменениям температуры цилиндров. Определить, воспользовавшись табличными данными отношение масс цилиндров  $m_{\text{Fe}}/m_{\text{Al}}$ .

### Решение

1. Удельные теплоёмкости металлов:  $c_{\text{Fe}} = 460$  Дж/кг·К,  $c_{\text{Al}} = 900$  Дж/кг·К

2. Количество получаемого цилиндрами тепла:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q &= c_{\text{Fe}} m_{\text{Fe}} \Delta T; \\ \Delta Q &= c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} \Delta T; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{m_{\text{Fe}}}{m_{\text{Al}}} = \frac{c_{\text{Al}}}{c_{\text{Fe}}} = 1,96;$$

24. Две частицы с отношением зарядов  $q_2/q_1 = 1/2$ , влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найти отношение масс частиц  $m_2/m_1$ , если их кинетические энергии одинаковы, а радиусы траекторий  $R_2/R_1 = 2$ .

### Решение

1. Определим соотношение скоростей частиц из условия их нахождения на стационарных круговых орбитах

$$\left. \begin{aligned} q_2 v_2 B &= \frac{m_2 v_2^2}{R_2}; \\ q_1 v_1 B &= \frac{m_1 v_1^2}{R_1}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2}; \Rightarrow v_1 = v_2;$$

2. По условию задачи кинетические энергии частиц одинаковы, это может быть только при  $m_1 = m_2$ .

25. Найти работу выхода электронов из освещённой пластины, если запирающее напряжение равно  $U = 3 \text{ В}$ , а длина волны падающего на фотокатод света  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

**Решение**

1. Уравнение фотоэффекта, выраженное через запирающее напряжение

$$\frac{hc}{\lambda} = eU + A; \Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda} - eU \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cong 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

В1. В калориметр, имеющий комнатную температуру, положили кусок льда при  $0 \text{ }^\circ\text{С}$ . Как изменятся в результате установившегося теплового равновесия следующие три величины: удельная теплоёмкость льда, масса воды, масса льда:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится?

**Решение**

1. Удельная теплоёмкость является физическим свойством вещества, поэтому в данных условиях изменяться не будет.

2. Если комнатную температуру принять  $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ , то наступление равновесия данной термодинамической системы наступит когда весь лёд из твёрдой фаза перейдёт в жидкую, а образовавшаяся вода примет температуру окружающей среды. Другими словами, масса льда уменьшится, а масса воды увеличится.

Удельная теплоёмкость льда	Масса воды	Масса льда
3	1	2

В2. При настройке контура радиопередатчика его индуктивность увеличили. Как при этом изменятся: период колебаний тока в контуре, частота излучаемых радиоволн, длина волны излучения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится?

**Решение**

1. Период колебаний силы тока в контуре в соответствии с формулой Томсона  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ , при увеличении индуктивности тоже увеличится.

2. Частота излучения:  $\nu = 1/T$ , значит, частота при увеличении периода колебаний – уменьшится.

3. Длина электромагнитной волны:  $\lambda = c/\nu$ : уменьшение частоты приведёт к увеличению длины излучаемой волны.

Период колебаний тока в контуре	Частота излучаемых волн	Длина излучаемых волн
1	2	1

В3. Установить соответствие между физическими явлениями и приборами для их изучения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ		ПРИБОРЫ ДЛЯ ИХ ИЗУЧЕНИЯ
А) постоянный ток		1) микроскоп
Б) броуновское движение		2) амперметр
		3) камера Вильсона
		4) манометр

Рис. В3. Соответствие физических явлений и приборов для их изучения

**Решение**

А	Б
2	1

В4. Шарик брошен вертикально вверх с начальной скоростью  $v_0$ . Установить соответствие между графиками и физическими величинами.  $t_0$  – время полёта шарика.

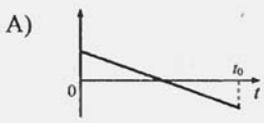
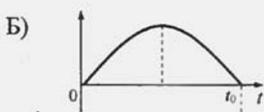
ГРАФИКИ	ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ
А) 	1) координата шарика $y$
Б) 	2) проекция скорости шарика $v_y$
	3) проекция ускорения шарика $a_y$
	4) проекция $F_y$ силы тяжести, действующей на шарик

Рис. В4. Зависимости физических величин от времени

**Решение**

1. Ускорение шарика без учёта сил сопротивления будет постоянным, равным  $g$ .

2. Проекция силы тяжести тоже будет неизменной  $F_y = mg$ .

3. Уравнения движения шарика

$$y_{\Pi}(t) = v_0 t - \frac{gt^2}{2}; \quad y_{C}(t) = \frac{gt^2}{2}; \quad v_{y(\Pi)} = v_0 - gt; \quad v_{y(C)} = gt;$$

Зависимость скорости линейная (А), а координаты – нелинейная (Б)

А	Б
2	1